

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département : Electromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Commandes Electriques

Par : - Rebadj Seif Eddine

- Kerai badr Eddine

Sujet :

Étude et simulation d'une commande en vitesse appliquée à la MSAP

Soutenu publiquement, le 30 / 06 /2025 , devant le jury composé de :

Mr : AISSA Oualid	MCA	Univ-BBA	Président
Mr : ZAIDI Elyazid	MCB	Univ-BBA	Examineur
Mr : TALHAOUI Hicham	Pr	Univ-BBA	Encadrant



REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier (الله جل و علا) de nous avoir donné la force, la patience et le courage d'accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier sincèrement [Mr. Talhaoui Hicham](#), notre encadrant, pour sa disponibilité, ses conseils judicieux, son accompagnement et ses encouragements tout au long de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements et nos gratitudes aux membres du jury pour nous avoir donné part de leur temps et accepté l'étude et la discussion de notre mémoire à bras ouverts.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude à l'ensemble des enseignants du département d'Electromécanique pour la qualité de leur enseignement et leurs efforts.

Nous tenons également à remercier nos familles, ainsi qu'à toutes celles et ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce mémoire.

DÉDICACE

إلى من غرسني في القيم، وربّني على مكارم الأخلاق...

إلى من كان سندي ومعيني في دربي...

إلى من سهرت الليالي من أجلي، وضحت بالكثير في سبيل راحتي...

أهدي هذا العمل إلى والدي ووالدي، اللذين كانا ولا يزالان مصدر إلهامي ودعمي في كل مراحل حياتي.

إلى أختي العزيزة، التي كانت لي خير رفيق في رحلتي، وساندتني في اللحظات الصعبة.

إلى أساتذتي الأفاضل الذين علموني وساهموا في صقل معرفتي، وأخص بالذكر أستاذي طحاي هشام، الذي كان عونًا لي في

كل خطوة من خطوات هذا العمل.

إلى كل من دعموني بكلمة طيبة، أو نصيحة، أو دعاء صادق...

وختامًا، أحمد الله تبارك وتعالى وأشكره على توفيقه وفضله، فلولاه ما تم هذا العمل.

سيف الدين

DÉDICACE

الحمد لله الذي علّم بالقلم، علّم الإنسان ما لم يعلم، وبفضله وكرمه تحقق هذا الإنجاز.

بكل فخر وامتنان، أهدي هذا التخرج لكل من كان له أثر في رحلتي الدراسية المليئة بالشغف والطموح

إلى أمي وأبي وإخوتي، الذين كانت دعواتهم ودعمهم النور الذي أضاء دربي،

وإلى أصدقائي الذين تقاسموا معي لحظات التعب والفرح.

وإلى أستاذي الفاضل طحاوي هشام،

كل كلمات الشكر لا تفيكم حقكم،

فكنتم دائماً مثلاً للعباء والتواضع،

فلكم مني كل التقدير والاحترام، واعتزاز كبير أنني كنت من طلابكم

هذا التخرج يحمل في طياته جهد سنوات،

لكنّه أيضاً يحمل بصمة كل من ساندني... فشكراً من القلب.

بدر الدين

SOMMAIRE

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux.....	II
Liste des symboles.....	III
Liste des abréviations.....	IV

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : Généralités sur les machines électriques et modélisation de la MSAP

I.1 Introduction.....	2
I.2 Machines électriques.....	2
I.2.1 Différents types des machines électriques	2
I.2.1.1 Machines électriques à courant continu.....	3
I.2.1.2 Machines électriques à courant alternatif	4
I.3 Généralités sur la machine synchrones à aimants permanents	6
I.3.1 Description générale des machines synchrones à aimants permanents.....	6
I.3.2 Avantages des machines à aimants permanents	7
I.3.3 Inconvénients des machines à aimants permanents	8
I.3.4 Domaines d'application des machines à aimants permanents	8
I.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	8
I.4.1 Modèle de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère a, b et c :.....	9
I.4.2 Transformation de Park	11
I.4.2.1 Principe de la transformation de Park.....	11
I.4.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents dans le modèle de Park	12
I.5 Mise sous forme d'équation d'état.....	14
I.6 Conclusion	15

CHAPITRE II : Stratégies de commande de la MSAP

II.1 Introduction	16
II.2 Différents types de commandes et de régulateurs des machines synchrones à aimants permanents	16
II.2.1 Commande scalaire	16

Sommaire

II.2.2	Commande vectorielle	16
II.2.3	Commande directe du couple (DTC)	17
II.2.4	Commande par mode glissant	17
II.2.5	Régulation par réseaux de neurones	17
II.2.6	Régulation par logique floue	18
II.3	Commande vectorielle	18
II.3.1	Principe de commande vectorielle	18
II.3.2	Types de commande vectorielle	19
II.3.3	Avantages et inconvénients de la commande vectorielle	19
II.3.4	Stratégie de la commande vectorielle de la MSAP	19
II.3.5	Découplage par compensation	20
II.3.6	Synthèse des différents régulateurs	21
II.3.7	Calculs des régulateurs	22
II.3.7.1	Régulateurs des courants	22
II.3.7.2	Régulateur de vitesse	23
II.4	Commande par logique floue	25
II.4.1	Fonctions d'appartenance	25
II.4.2	Système de commande Flou	26
II.4.2.1	Fuzzification	27
II.4.2.2	Mécanisme d'inférence	27
II.4.2.3	Défuzzification	27
II.4.3	Synthèses du régulateur de vitesse	27
II.4.4	II.4.4 Avantages et inconvénients de la commande par logique floue	29
II.5	Conclusion	30

CHAPITRE III : Simulation et interprétation des résultats

III.1	Introduction	31
III.2	Paramètres de la MSAP	31
III.3	Résultats de simulation	31
III.3.1	Simulation de la MSAP	32
III.3.2	Commande vectorielle	33
III.3.2.1	Régulation de la vitesse par PI avec anti-windup	33
III.3.2.2	Régulation de la vitesse par logique flou	36
III.3.3	Etude comparative	38

Sommaire

III.4 Conclusion.....	40
Conclusion générale	41
Références bibliographiques.....	42

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1: Différentes fonctions d'une machine électrique .	2
Figure I. 2: Constitution de la machine à courant continu .	3
Figure I. 3: Structure interne de la Machine Asynchrone .	5
Figure I. 4: Structure interne de la Machine synchrone .	6
Figure I. 5: Machine synchrone à aimants permanents .	7
Figure I. 6: Schéma de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère triphasé (a, b et c) .	9
Figure I. 7: Schéma équivalent de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère (d , q) .	12
Figure II. 1: Principe de la commande vectorielle .	18
Figure II. 2 : Description du couplage entre l'axe «d» et «q» .	20
Figure II. 3: Découplage par compensation .	21
Figure II. 4: Régulateur PI .	22
Figure II. 5: Boucles de régulation des courants .	22
Figure II. 6: Boucle de régulation du courant i_d .	23
Figure II. 7: Boucle de régulation du courant i_q .	23
Figure II. 8: Boucle de régulation de la vitesse .	23
Figure II. 9: Boucle de régulation de vitesse avec limitation .	24
Figure II. 10: Régulateur PI avec anti-windup .	25
Figure II. 11: Différentes formes des fonctions d'appartenance .	26
Figure II. 12: Schéma synoptique du système flou .	26
Figure II. 13: Schéma bloc de régulation à contrôleur flou .	28
Figure II. 14: Fonction d'appartenance des variables d'entrées. .	28
Figure II. 15: Fonction d'appartenance de la variable de sortie. .	29
Figure III. 1: Schéma de la commande vectorielle de la MSAP avec régulateur PI avec anti-windup et Flou, réalisé sous MATLAB / SIMULINK.....	32
Figure III. 2: Courbe de la vitesse de rotation .	33
Figure III. 3: Courbe du couple électromagnétique .	33
Figure III. 4: Étude comparative de la vitesse entre le régulateur PI sans et avec anti-windup .	34
Figure III. 5: Courbe de la vitesse de rotation .	35
Figure III. 6: Courbe du couple électromagnétique .	35
Figure III. 7: Courbe du courant sur l'axe q .	35
Figure III. 8: Courbe du courant sur l'axe d. .	36
Figure III. 9: Courbe de la vitesse de rotation .	36
Figure III. 10 : Courbe du couple électromagnétique .	37
Figure III. 11: Courbe du courant sur l'axe q .	37
Figure III. 12: Courbe du courant sur l'axe d. .	37

Figure III. 13: Étude comparative de la vitesse entre le régulateur PI avec anti-windup et le régulateur à logique floue.....	38
Figure III. 14: Réponse de la vitesse – phase de démarrage (Zoom 1)..	39
Figure III. 15 : Réponse de la vitesse lors d’une perturbation (Zoom 2).....	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II 1: Table de vérité	29
Tableau III 1 : Paramètres de la machine synchrone à aimants permanents	31

LISTE DES SYMBOLES

V_{abc}	Les tensions des phases statoriques	V
i_{abc}	Les courants des phases statoriques	A
ω_r	Vitesse de rotation de la machine	Rad/s
ω	Vitesse électrique	Rad/s
θ	Position angulaire du rotor par rapport au stator	Rad
$\mathcal{C}_r$	Couple résistant	N.m
$\mathcal{C}_e$	Couple électromagnétique	N.m
$\mathcal{C}_f$	Couple de frottement	N.m
J	Moment d'inertie	Kg.m ²
P	Nombre de paires de pôles	/
f_r	Coefficient de frottement	/
$P(\theta)$	Matrice de transformation de Park	/
R_s	Résistance statorique	Ω
ξ	Coefficient d'amortissement	/
φ_f	Valeur crête (constante) du flux créée par l'aimant	Wb
X_{abc}	Représente les variables considérées de la machine (tensions, courants ou flux)	/
$[R_s]$	Matrice de résistance du stator	/
$[L_s]$	Matrice d'inductance du stator	/
$[\varphi_f]$	Vecteur de flux engendré par l'aimant	/
V_d	Tension statorique sur l'axe d	V
V_q	Tension statorique sur l'axe q	V
i_d	Courant statorique sur l'axe d	A
i_q	Courant statorique sur l'axe q	A
L_d	Inductance statorique sur l'axe d	H
L_q	Inductance statorique sur l'axe q	H
S	Opérateur de Laplace	/

LISTE DES ABRÉVIATIONS

MSAP	Machine Synchrone à Aimants Permanents.
MCC	Machine à Courant Continu.
MAS	Machine Asynchrone.
DC/AC	Courant continu/Courant alternatif.
MS	Machine synchrone.
PI	Proportionnel-Intégral.
FOC	Field Oriented Control.
NG	Négatif Grand.
NM	Négatif Moyen.
NP	Négatif Petite.
ZE	Zéro.
PP	Positif Petite.
PM	Positif Moyen.
PG	Positif Grand.

Introduction

Générale

Introduction générale

Les machines électriques à courant continu, synchrones et asynchrones répondent aux besoins de l'industrie depuis de nombreuses années. Autrefois, la commande de ces machines était manuelle et nécessitait des équipements complexes et coûteux [1]. La commande des machines électriques est devenue l'un des domaines les plus intéressants, en particulier ces dernières années, en raison de son importance dans le domaine industriel et économique [2].

Le but de notre travail est d'étudier et de simuler la commande de vitesse d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) à l'aide de la commande vectorielle, en mettant en œuvre deux stratégies de régulation de la vitesse : d'abord un régulateur conventionnel de type PI (sans anti-windup, puis avec anti-windup), puis un régulateur basé sur la logique floue.

Afin de bien présenter notre travail, ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre donne une vue d'ensemble des machines électriques, puis se concentre sur la MSAP en particulier, en étudiant sa structure et ses performances. Par ailleurs, ce chapitre traite également de la modélisation de la MSAP dans le repère triphasé (A, B et C), ainsi que de la transformée de Park qui simplifie la modélisation de cette machine.

Le deuxième chapitre présente quelques méthodes de contrôle. En outre, il traite de la conception de la commande vectorielle. Ce chapitre présente également les concepts de base de la logique floue appliquée aux techniques de commande, en mettant l'accent sur son application à la stimulation de la MSAP.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation et à l'interprétation des résultats de simulation obtenus.

Enfin, le travail se termine par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les machines
électriques et modélisation de
la MSAP

I.1 Introduction

Les machines électriques sont actuellement l'un des équipements les plus utilisés et les plus nombreux dans le domaine industriel [3]. Parmi les nombreuses applications industrielles, citons les entraînements industriels, l'industrie automobile, l'industrie aéronautique, les systèmes de traction, l'industrie agricole, etc [4].

Dans ce chapitre, nous donnerons un aperçu des différentes machines électriques et de leur fonctionnement. Nous présenterons ensuite la machine synchrone à aimants permanents (MSAP), qui est l'objet de notre étude. En outre, nous présenterons dans ce chapitre la modélisation de la MSAP.

I.2 Machines électriques

Les machines électriques sont des dispositifs électromagnétiques qui convertissent l'énergie électrique en énergie magnétique par l'intermédiaire de bobines de cuivre. Grâce à cette énergie magnétique, de l'énergie mécanique est générée. Le dispositif qui assure cette conversion est le moteur. Cette méthode permet également de générer de l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique, et le dispositif utilisé pour cette conversion est appelé générateur [5].

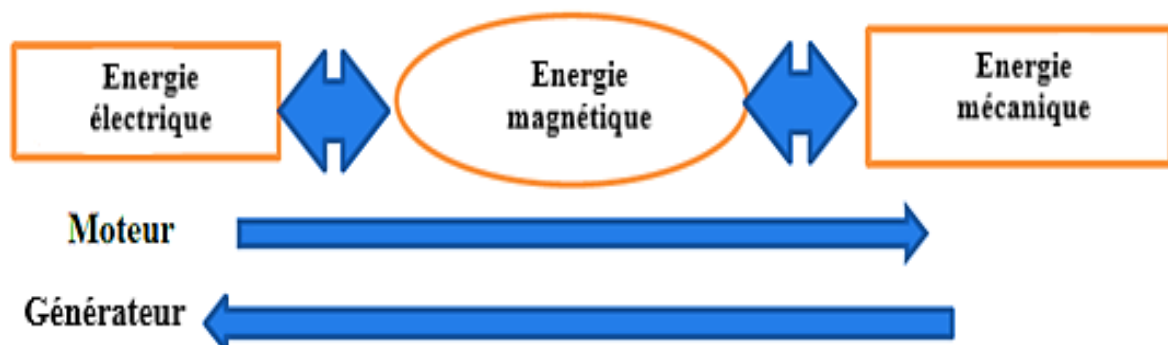


Figure I.1 : Différentes fonctions d'une machine électrique [5].

I.2.1 Différents types des machines électriques

Selon le type de courant électrique qui traverse les bobines, les machines électriques se divisent en deux types : les machines électriques à courant continu et les machines électriques à courant alternatif [5].

I.2.1.1 Machines électriques à courant continu

Selon l'application et les différentes modes de connexion entre les bobinages de l'inducteur et de l'induit, on distingue différents types de MCC [6].

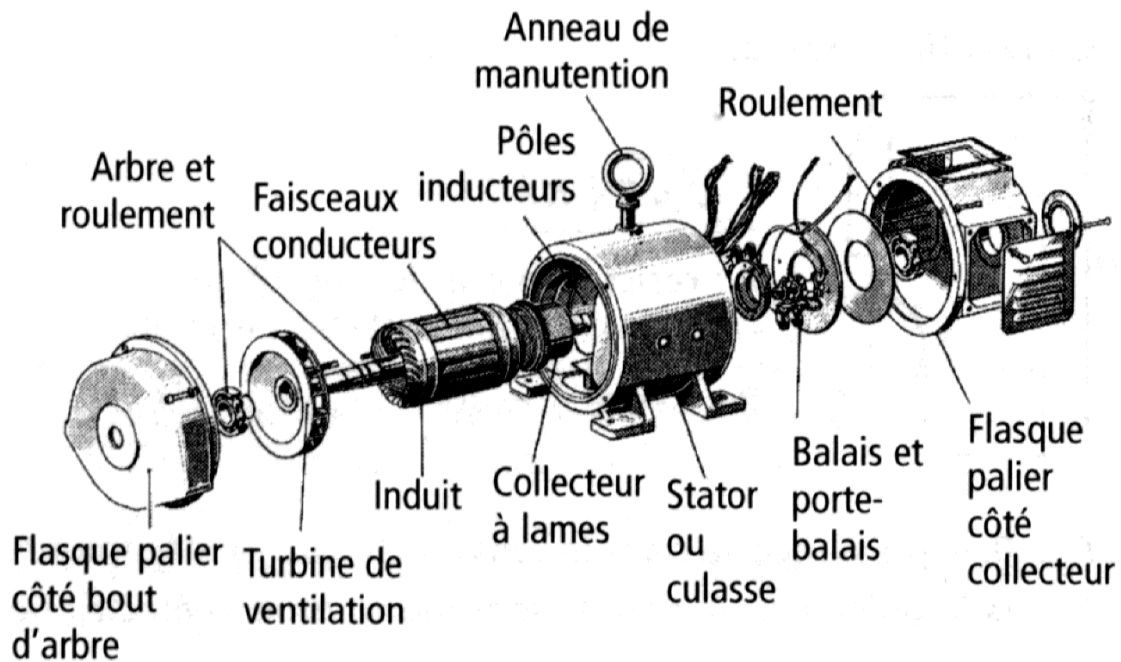


Figure I.2 : Constitution de la machine à courant continu [7].

❖ Moteur à excitation parallèle (ou shunt)

L'inducteur et l'induit sont connectés en parallèle dans le moteur [8].

❖ Moteur à excitation série

Le moteur série est constitué de deux enroulements, induit et inducteurs montés en série (même courant) [7].

❖ Moteur à excitation composée

Le moteur composé est un mélange entre le moteur à excitation série et le moteur à excitation shunt. Ce type de moteur comprend deux inducteurs, un bobinage série et un bobinage à shunt [8].

❖ Moteur à excitation indépendante

Le moteur à excitation indépendante se compose de deux enroulements, l'enroulement de l'induit et l'enroulement de l'inducteur, qui sont alimentés indépendamment par deux sources distinctes [7].

I.2.1.2 Machines électriques à courant alternatif

Les machines à courant alternatif alimentées par des onduleurs de stator deviennent de plus en plus populaires. Les machines asynchrones et synchrones sont deux types de machines électriques à courant alternatif largement utilisées dans le secteur industriel [5].

❖ Machines asynchrones

Les machines asynchrones triphasées sont les plus couramment utilisées dans l'industrie pour entraîner des équipements. Ces machines s'imposent en effet dans un grand nombre d'applications en raison des avantages qu'elles présentent : normalisées, elles sont robustes, simples d'entretien, faciles à mettre en œuvre et de faible coût [9].

En raison des pertes par effet Joule, il est moins performant qu'un moteur synchrone, ce qui constitue son principal inconvénient [10].

La machine asynchrone est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor. Contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seul les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation dont les tensions (amplitude et fréquence) définissent l'état magnétique de l'entrefer. Les enroulements du rotor sont raccordés sur eux-mêmes. Le moteur asynchrone ne possède donc ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Pour ce qui est du flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique, il est produit à partir de l'induction [11].

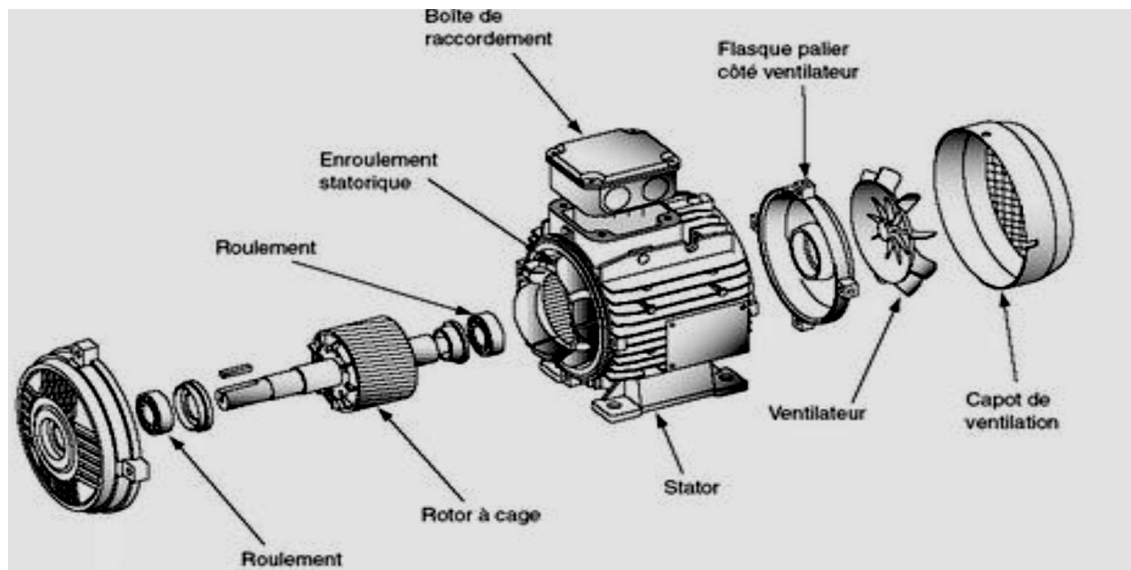


Figure I.3 : Structure interne de la Machine Asynchrone [12].

❖ Machines synchrones

La machine synchrone bénéficie d'un avantage déterminant par rapport au moteur à courant continu, à savoir l'absence de contacts glissants (collecteur + balais). De plus, il n'y a pas de production d'étincelles, ce qui augmente les domaines d'utilisation [13].

La machine synchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile de l'axe de symétrie de la machine. Dans les encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques, à paires de pôles ; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égal à $2\pi/3$. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques [13].

Cette catégorie de machines comprend plusieurs sous-catégories, allant des alternateurs de plusieurs centaines de mégawatts à des moteurs de quelques watts. Cependant, la configuration de toutes ces machines est très similaire. Le stator se compose généralement de trois enroulements triphasés [14].

En fait, cette famille de machines comprend plusieurs sous-familles [14]:

- Les machines synchrones à rotor bobiné.
- Les machines synchrones à réluctance.
- Les machines synchrones à aimants permanents.

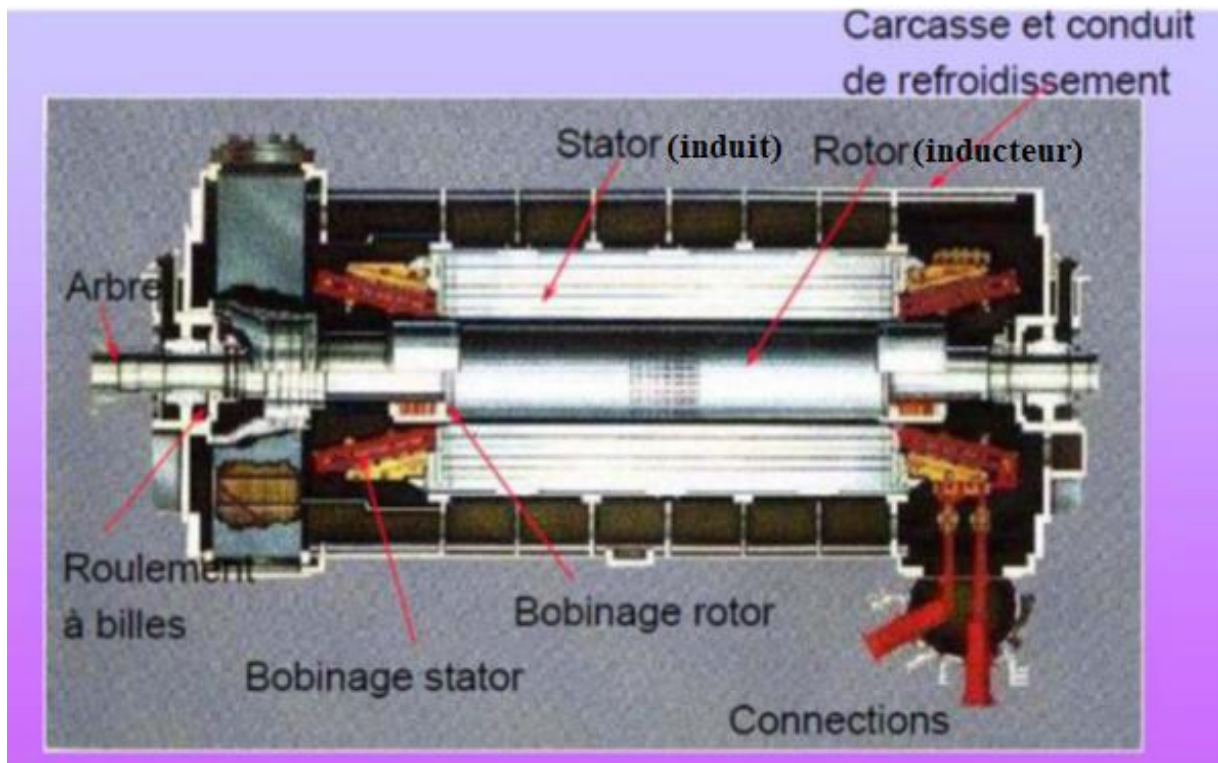


Figure I.4 : Structure interne de la Machine synchrone [15].

Dans le cadre de notre étude des machines électriques, et plus particulièrement de ces sous-familles de machines électriques synchrones, nous nous intéressons à l'une des machines les plus importantes et les plus utilisées dans les applications modernes, la machine synchrone à aimants permanents. Cette machine se caractérise par un rendement élevé et des performances exceptionnelles, ce qui en fait un choix idéal dans de nombreux domaines tels que les véhicules électriques, les avions, les industries de précision, etc.

I.3 Généralités sur la machine synchrones à aimants permanents

I.3.1 Description générale des machines synchrones à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents se compose d'un stator (induit) triphasé et d'un rotor (inducteur) monté avec des aimants permanents qui fournissent le flux de champ. Cette machine n'a pas besoin d'un approvisionnement extérieur pour exciter le rotor (inducteur). L'absence du bobinage d'excitation réduit le coût et élimine les pertes de puissance liées à cet enroulement. Le moteur synchrone à aimants permanents réduit d'espace occupé que dans le cas d'un bobinage d'excitation, pour une taille donnée [16].

Il se distingue également par un certain nombre de caractéristiques : faible moment d'inertie, puissance massive élevée, fonctionnement souple à vitesse variable et commande simplifiée. Il est recommandé pour certaines applications à haute performance, telles que celles utilisées dans les machines-outils, l'espace, etc [16].

Il existe deux configurations de MSAP en fonction de la disposition des aimants avec les matériaux magnétiques. L'une comprend des pièces polarisées et l'autre sans pièces polaires. Les configurations possibles entre ces deux catégories sont très nombreuses [16].



Figure I.5 : Machine synchrone à aimants permanents [17].

I.3.2 Avantages des machines à aimants permanents

Un avantage évident de l'utilisation des aimants au niveau de la production du flux est l'élimination des pertes dues à l'effet Joule du système inducteur. Dans le contexte des machines conventionnelles, il est possible de démontrer que les pertes par effet Joule, rapportées à la puissance utile, sont d'autant plus importantes que la taille de la machine est réduite. L'un des autres avantages de l'excitation par aimants est l'amélioration de la sécurité opérationnelle. Les moteurs synchrones à aimants sont intéressants en termes de puissance, de rendement, de facteur de puissance et de moment d'inertie [18].

I.3.3 Inconvénients des machines à aimants permanents

Parmi les inconvénients principaux d'une machine synchrone à aimants permanents, on peut citer les suivants [19]:

- Le flux inducteur de la machine à aimant est difficile à régler, de ce fait la commande du moteur est effectuée par action extérieure en particulier dans le cas d'inducteur à pôles saillants.
- Pour le fonctionnement en moteur, il est souvent nécessaire d'utiliser un moteur auxiliaire de démarrage.
- Si le couple résistant dépasse une certaine limite, le moteur décroche et s'arrête.

I.3.4 Domaines d'application des machines à aimants permanents

L'utilisation de machines synchrones à aimants permanents est très répandue dans divers domaines tels que les machines-outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux et la traction électrique [20].

Actuellement, le champ d'application de la MSAP est limité à quelques dizaines de kilowatts en raison des propriétés magnétiques des aimants, qui peuvent être perdues si les limites fonctionnelles sont dépassées [20].

I.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

Le développement d'un modèle mathématique de la MSAP est nécessaire pour étudier son contrôle, aussi bien dans les régimes transitoires que permanents [21].

Les hypothèses simplificatrices habituelles utilisées dans la modélisation des machines, qui sont mentionnées dans la plupart des références, sont les suivantes [20, 22] :

- Les circuits magnétiques ne sont pas saturés, ce qui permet d'exprimer le flux, comme fonction linéaire des courants.
- Les pertes par courants de Foucault et par hystérésis sont négligées.
- La distribution de la force magnétomotrice créée par les enroulements au stator est sinusoïdale.
- Le système de tension est équilibré.

- Il n'existe pas d'enroulement amortisseur au rotor, et l'effet des amortisseurs est négligé.

I.4.1 Modèle de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère a, b et c :

La figure I.6 montre une représentation schématisée d'une machine synchrone à aimants permanents dans le repère triphasé (a, b et c) [20].

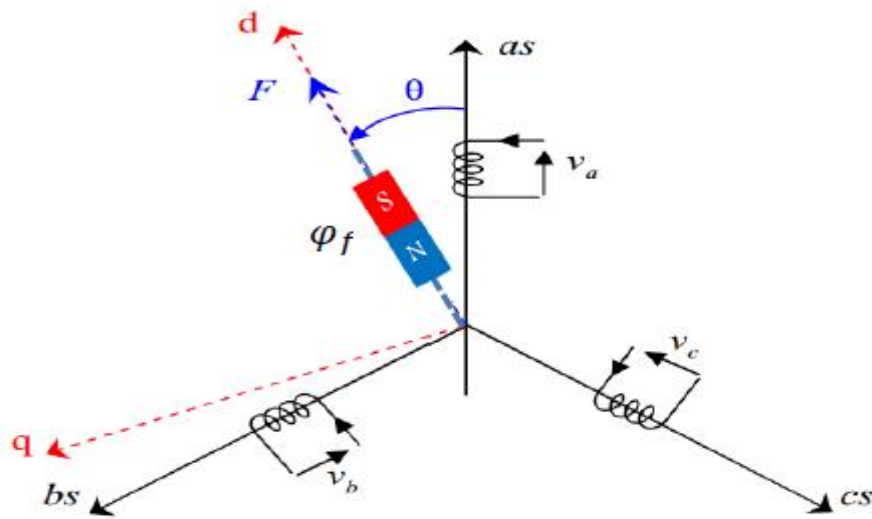


Figure I.6 : Schéma de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère triphasé (a, b et c) [20].

❖ Équations électriques

Les notations vectorielles utilisées pour les tensions, les flux et les courants statoriques triphasés sont respectivement : $[V_s]$ $[\varphi_s]$ $[i_s]$ [23].

$$[V_s] = [R_s] [i_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (\text{I.1})$$

$$[\varphi_s] = [L_s] [i_s] + [\varphi_f] \quad (\text{I.2})$$

Avec

$$[V_s] = [V_a \ V_b \ V_c]^T \quad : \text{Vecteur de tensions statoriques ;}$$

$$[i_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^T \quad : \text{Vecteur de courants statoriques ;}$$

$$[\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T \quad : \text{Vecteur de flux statoriques ;}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad : \text{Matrice de résistance du stator ;}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \quad : \text{Matrice d'inductance du stator ;}$$

$$[\varphi_f] = \varphi_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad : \text{Vecteur de flux engendré par l'aimant.}$$

Où :

φ_f : Valeur crête (constante) du flux crée par l'aimant.

θ : Position angulaire du rotor par rapport au stator [23, 24]:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega d(T) \quad (I.3)$$

Avec :

$$\omega = p * \omega_r;$$

ω : Pulsation électrique ;

p : Nombre de pair de pôles de la machine ;

ω_r : Vitesse de rotation de la machine (rotor).

Le modèle électrique doit être complété par les expressions du couple électromagnétique et de la vitesse, décrivant ainsi le mode mécanique.

❖ Équation électromagnétique

La connaissance du couple électromagnétique de la machine est essentielle pour l'étude de la machine et sa commande [23, 24].

$$C_e = [i_s]^T \left[\frac{d[L_{ss}]}{2d\theta} \right] [i_s] + \frac{d[\varphi_f]}{2d\theta} \quad (I.4)$$

❖ Équations mécaniques

L'expression mécanique de la machine est formulée comme suit [13]:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega_r}{dt} = (C_e - C_r - C_f) \\ C_f = F_r \omega_r \end{cases} \quad (I.5)$$

Avec :

$\omega_r = \frac{\omega}{p}$: Vitesse mécanique de rotation de la machine.

C_r : Couple résistant.

C_e : Couple électromagnétique.

C_f : Couple de frottement.

J : Moment d'inertie.

F_r : Coefficient de frottement.

I.4.2 Transformation de Park

I.4.2.1 Principe de la transformation de Park

La transformation de Park est un modèle mathématique consiste à transformer le système triphasé (a, b et c) en un système diphasé (d et q). Ce passage mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor, l'aimant se situe sur l'axe d [17].

Pour passer du système triphasé (a, b et c), au système biphasé (d et q), (réciproquement) il faut utiliser les relations suivantes [17] :

$$\begin{cases} [X_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [X_{dqo}] \\ [X_{dqo}] = [P(\theta)] \cdot [X_{abc}] \end{cases} \quad (I.6)$$

Avec :

$[P(\theta)]$: Matrice de Park

X_{abc} : Représente les variables considérées de la machine (tensions, courants ou flux).

La composante homopolaire, ajoutée pour rendre la transformation réversible, elle est nulle lorsque le système est en équilibre.

Matrice de Park $[P(\theta)]$ qui conserve les amplitudes est la suivante [17] :

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (I.7)$$

La matrice inverse est donnée par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (I.8)$$

I.4.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents dans le modèle de Park

Nous utilisons la transformation de Park afin d'éliminer la non-linéarité dans les équations du modèle précédent. Cette transformation nous permet de remplacer les enroulements de phase (a, b et c) par deux enroulements (d et q), comme le montre la figure I.7 [20].

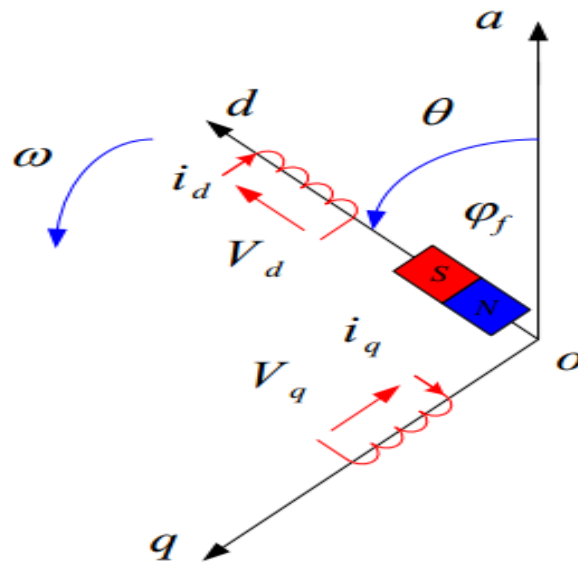


Figure I.7 : Schéma équivalent de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère (d , q) [20].

Le modèle de la machine, après la transformation de Park, est donné par [23 - 25]:

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - p\omega_r \varphi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + p\omega_r \varphi_d \end{cases} \quad (\text{I.9})$$

avec :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d * i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q * i_q \end{cases} \quad (\text{I.10})$$

A partir des équations I.9 et I.10, nous pouvons écrire l'équation suivante [24]:

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p\omega_r L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + p\omega_r (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{I.11})$$

Avec :

V_d : Tension statorique sur l'axe d.

V_q : Tension statorique sur l'axe q.

i_d : Courant statorique sur l'axe d.

i_q : Courant statorique sur l'axe q.

L_d : Inductance statorique sur l'axe d.

L_q : Inductance statorique sur l'axe q.

Le calcul du couple électromagnétique de la machine synchrone à aimants permanents dépend de la compréhension de la puissance instantanée $P(t)$, comme indiqué dans la référence [20].

D'après la référence [20], le couple électromagnétique s'écrit comme suit :

$$C_e = \frac{3P}{2} [(L_d - L_q)i_d i_q + \varphi_f i_q] \quad (\text{I.12})$$

I.5 Mise sous forme d'équation d'état

A partir des équations précédentes, on peut écrire [23, 24]:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega_r}{dt} + F_r \omega_r = C_e - C_r \\ \frac{di_d}{dt} = \frac{V_d}{L_d} - \frac{R_s i_d}{L_d} + p\omega_r \frac{i_q L_q}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{V_q}{L_q} - \frac{R_s i_q}{L_q} - p\omega_r \frac{i_d L_d}{L_q} - p\omega_r \frac{\varphi_f}{L_q} \\ C_e = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_d i_q + \varphi_f i_q] \end{cases} \quad (\text{I.13})$$

En prenant les courants statoriques (i_d et i_q) comme variables d'état, on peut écrire [20, 24, 26] :

$$\frac{dX}{dt} = AX(t) + BU \quad (\text{I.14})$$

X : vecteur d'état.

U : vecteur de commande.

A : matrice fondamentale qui caractérise le système.

B : matrice d'application de la commande.

Avec :

$$X = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \varphi_f \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} p \omega_r \\ -\frac{L_d}{L_q} p \omega_r & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_q} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{1}{L_q} p \omega_r \end{bmatrix}$$

Et :

$$\begin{cases} J \frac{d\omega_r}{dt} + F_r \omega_r = C_e - C_r \\ C_e = \frac{3P}{2} [(L_d - L_q) i_d i_q + \varphi_f i_q] \\ \omega_r = \frac{\omega}{P} \end{cases} \quad (\text{I.15})$$

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les types de machines électriques en général. Nous avons ensuite étudié la machine synchrone à aimants permanents en particulier, en expliquant ses différences par rapport aux autres types de machines électriques. Il présente également une modélisation de la MSAP à l'aide de la transformée de Park, qui simplifie le modèle et permet d'analyser son comportement avec plus de précision.

Dans le deuxième chapitre, nous étudierons les différentes techniques de commande pour la MSAP, en analysant chaque technique afin de choisir la méthode de commande la plus simple et la plus efficace pour obtenir les meilleures performances.

Chapitre II

Stratégies de commande de la
MSAP

II.1 Introduction

La commande des machines à courant alternatif est très difficile en raison de l'interdépendance entre le flux et le couple. Cette difficulté a encouragé le développement de plusieurs techniques de commande, telles que la commande vectorielle, pour faire fonctionner la machine comme les moteurs à courant continu, qui se caractérisent par une séparation naturelle entre le flux et le couple [27].

Dans ce chapitre, nous examinerons certaines techniques de commande pour les machines synchrones à aimants permanents. Par la suite, nous nous concentrerons sur la commande vectorielle et son amélioration à l'aide de la logique floue.

II.2 Différents types de commandes et de régulateurs des machines synchrones à aimants permanents

II.2.1 Commande scalaire

Le contrôle scalaire repose sur des relations valables en régime permanent. Seules l'amplitude et la fréquence de la tension et du courant sont contrôlées. La commande Volts/Hertz est l'un des systèmes de commande de moteur les plus simples. Son objectif est de maintenir le flux statorique constant à sa valeur nominale, afin que le moteur fournisse un rapport couple / ampérage nominal sur toute sa plage de vitesse [14].

II.2.2 Commande vectorielle

La commande vectorielle basée sur une régulation classique Proportionnel-Intégral (PI), associe dans sa structure des termes de compensation qui permette de découpler l'axe d (qui sera utilisé pour le réglage du flux) de l'axe q (qui sera utilisé pour le réglage du couple) [17].

La technique de la commande vectorielle permet de transformer la MSAP en une structure semblable à celle de la machine à courant continu à excitation séparée dans laquelle le flux n'est pas affecté par les variations du couple électromagnétique. Ce contrôle permet une amélioration du temps de réponse et un réglage rapide du couple [24].

II.2.3 Commande directe du couple (DTC)

Le contrôle direct du couple (DTC (Direct torque control)) a été introduit dans les années 1980 pour contrôler le couple et le flux des moteurs à induction. Il a été développé dans les années 1990 pour les moteurs synchrones (MSAP) [14].

Le principe du contrôle direct du couple (DTC) consiste à sélectionner directement le vecteur de tension en fonction de la différence entre la référence et la valeur réelle du couple et du flux. Les erreurs de couple et de flux sont comparées dans un comparateur à hystérésis. Un vecteur de tension est sélectionné dans une table en fonction des comparateurs [14].

II.2.4 Commande par mode glissant

Le mode glissant est un mode de fonctionnement particulier d'un système à structure variable. La commande par mode glissant est une méthode de régulation dans laquelle la structure est commutée de sorte que le vecteur d'état « x » suive la trajectoire $S(x)=0$ dans l'espace d'état. Cette méthode de contrôle peut s'adapter aux changements des paramètres du système à contrôler [15].

II.2.5 Régulation par réseaux de neurones

Un réseau neuronal artificiel (RNA) est un système de traitement de l'information capable d'apprendre, de mémoriser et d'exploiter des connaissances issues de l'expérience [28].

Les réseaux de neurones sont actuellement aussi devenus populaires dans le domaine du contrôle. En effet, ils ont prouvé leur succès dans la résolution de problèmes de reconnaissance de formes. Les réseaux de neurones ont la capacité d'apprendre des fonctions entrées-sorties, donc ils fournissent des solutions plus simples aux problèmes complexes de contrôle. En outre, les neurones sont des éléments non linéaires et, par conséquent, les réseaux neuronaux sont fondamentalement des systèmes non linéaires qui peuvent être utilisés pour apprendre et résoudre des problèmes de contrôle non linéaire, où les méthodes de contrôle traditionnelles et conventionnelles n'ont pas encore de solution. Ainsi, ces dernières années, le contrôle intelligent en général a été facilement acceptable pour les applications de contrôle réelles [29].

II.2.6 Régulation par logique floue

Dans les années soixante, Lotfi Zadeh a travaillé sur la théorie des ensembles flous et la logique floue, à l'université de Berkeley ont jeté les bases de la commande floue actuelle. Ces travaux ont mis un certain temps avant d'être acceptés par la communauté de l'automatique et l'industrie [30].

La logique floue est une méthode basée sur un degré de vérité qui existe sous la forme d'un nombre réel entre 0 et 1, en cela, elle diffère de la logique universelle (booléenne) basée sur deux extrêmes (1 ou 0). Elle est utilisée dans plusieurs domaines tels que l'automatique, la robotique et la médecine et est basée sur une théorie appelée la théorie des ensembles flous qui est une extension de la théorie classique qui prend en compte des ensembles qui ne sont pas précisément définis [31].

II.3 Commande vectorielle

II.3.1 Principe de commande vectorielle

Le principe de base de cette commande est de rendre le comportement de la machine synchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée, où le découplage est naturel entre le flux et le couple. Il faut donc choisir un système d'axes (d et q) et une loi de commande qui assure le découplage de flux et du couple [15].

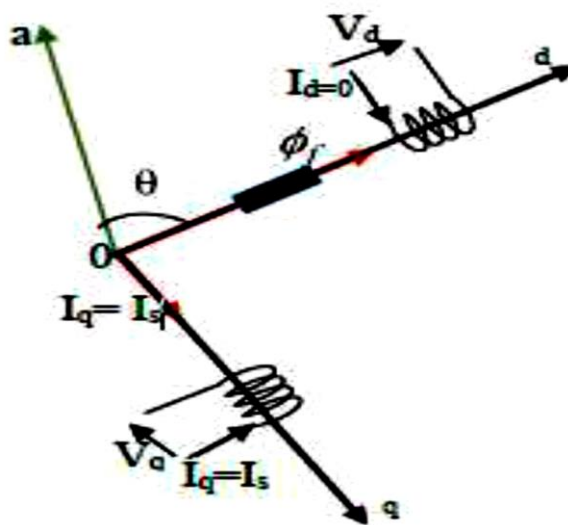


Figure II.1 : Principe de la commande vectorielle [32].

II.3.2 Types de commande vectorielle

On distingue deux types de commande vectorielle [15, 33] :

- Commande vectorielle directe.
- Commande vectorielle indirecte.

II.3.3 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle

La commande vectorielle offre de nombreux avantages, mais comporte également certaines limites [33, 34].

✓ Avantages de la commande vectorielle [33, 34].

- Elle est basée sur le modèle transitoire (traiter les régimes transitoires ce que ne permettait pas de faire le variateur classique).
- Elle est précise et rapide.
- Il y a un contrôle du couple à l'arrêt.
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase.

✓ Inconvénients de la commande vectorielle [33, 34].

- Très chère (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse, DSPACE.).
- Faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celles de la constante de temps rotorique.
- Nécessité d'un modulateur pour la commande rapprochée de l'onduleur qui provoque des retards, surtout à basse fréquence de modulation (grande puissance). Ces retards sont responsables d'une augmentation du temps de réponse en couple, ce qui pénalise les variateurs utilisés en traction.

II.3.4 Stratégie de la commande vectorielle de la MSAP

La machine synchrone à aimants permanents est un système multi variable non linéaire et fortement couplé. La stratégie de commande la plus souvent utilisée est celle qui consiste à maintenir le courant i_d à une valeur nulle. Le modèle de la MSAP alimenté en tension et donné par les équations suivantes [15] :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Le couple s'exprime par la relation suivante [15] :

$$C_e = \frac{3}{2}P[(L_d - L_q)i_d i_q + \varphi_f i_q] \quad (\text{II.2})$$

Si le courant i_d est nul, on peut écrire [15] :

$$C_e = \frac{3}{2}P \varphi_f i_q \quad (\text{II.3})$$

Comme on a le flux φ_f est constant, le couple électromagnétique est directement proportionnel à i_q .

II.3.5 Découplage par compensation

L'alimentation en tension est obtenue en imposant les tensions de référence à l'entrée de la commande de l'onduleur. Ces tensions permettent de définir les rapports cycliques sur les bras de l'onduleur de manière à ce que les tensions délivrées par cet onduleur aux bornes du stator de la machine soient les plus proches possible des tensions de référence. Mais, il faut définir des termes de compensation, car, dans les équations statoriques, il y a des termes de couplage entre les axes d et q [35].

Le couplage entre l'axe d et l'axe q est illustré à la figure II.2.

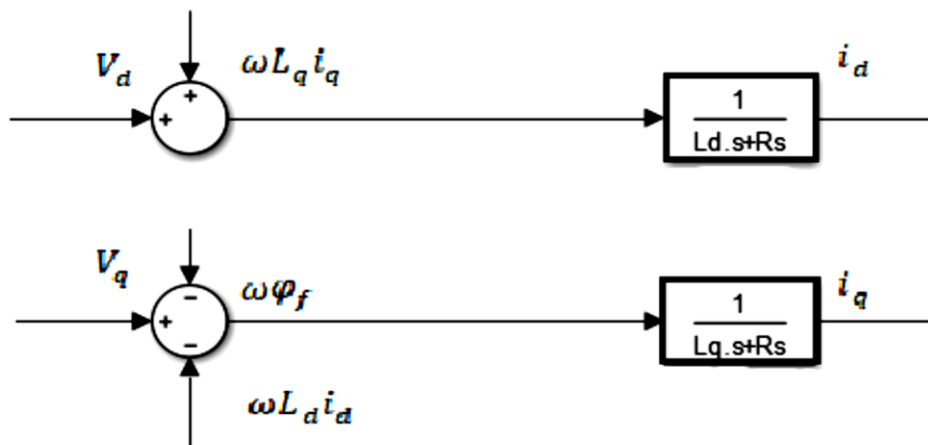


Figure II.2 : Description du couplage entre l'axe «d» et «q» [36].

Les tensions V_d et V_q dépendent à la fois des courants sur les axes «d» et «q», on est donc amené à implanter un découplage. Ce découplage est basé sur l'introduction des termes compensatoires e_d et e_q [23] :

Avec :

$$\begin{cases} e_d = \omega L_q i_q \\ e_q = -\omega(L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

A partir de l'équation II.1 et II.4 on a [23];

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - e_d \\ V_q = V_{q1} - e_q \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + S \cdot L_d) i_d \\ V_{q1} = (R_s + S \cdot L_q) i_q \end{cases}$$

Et :

$$\begin{cases} e_d = \omega L_q i_q \\ e_q = -\omega(L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

S: Opérateur de Laplace.

Ainsi, les deux composantes de courants i_d et i_q sont découplées.

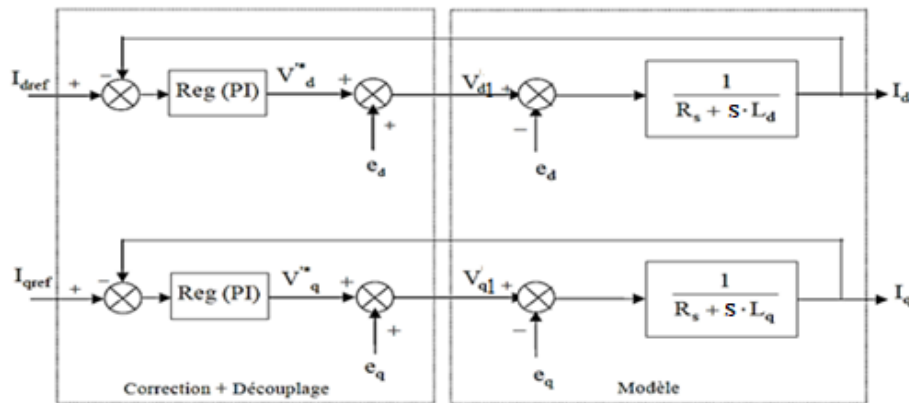


Figure II.3 : Découplage par compensation [35].

II.3.6 Synthèse des différents régulateurs

Le régulateur (PI) est la mise en parallèle des actions proportionnelle et intégrale, comme montre la figure (II.4). La relation entre la sortie $U_r(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est donné par la relation suivante [37] :

$$U_r(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + k_i \cdot \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad (\text{II.7})$$

Avec :

k_p : Gain proportionnel ;

k_i : Gain intégral.

La figure II.4 représente le régulateur (PI) :

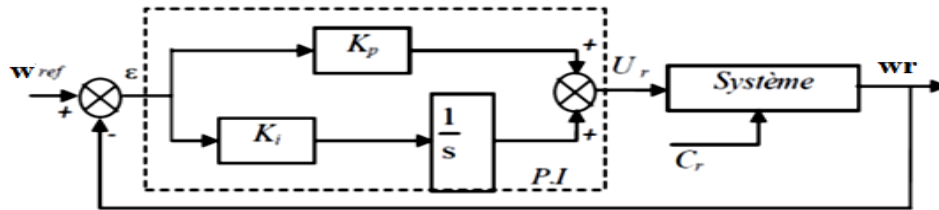


Figure II.4 : Régulateur PI [37].

L'action intégrale a pour effet de réduire l'écart entre la consigne et la grandeur régulée. L'action proportionnelle permet le réglage de la rapidité du système [38].

II.3.7 Calcul des régulateurs

La machine étant découplée selon deux axes(d, q), la régulation sur l'axe d est faite par une seule boucle, tandis que la régulation sur l'axe q est faite par deux boucles en cascades l'une pour réguler le courant et l'autre pour réguler la vitesse [37].

II.3.7.1 Régulateurs des courants

La figure II.5 représente les boucles de régulation des courants [39].

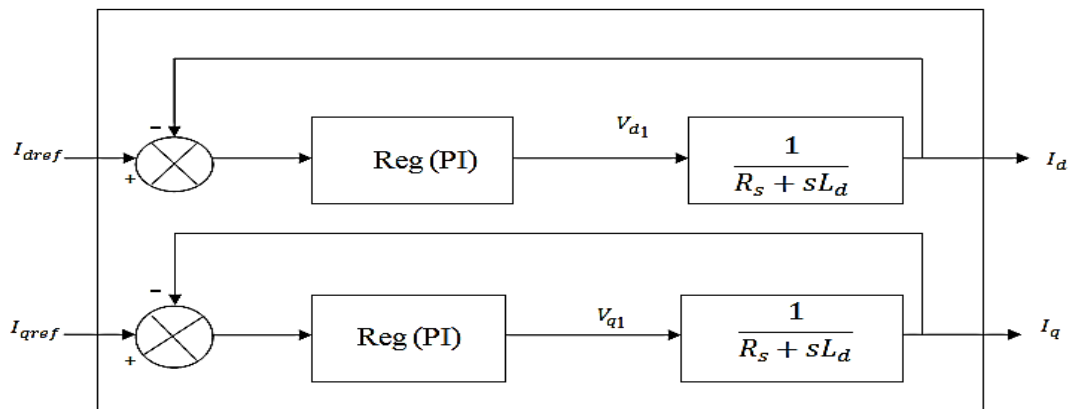


Figure II.5 Boucles de régulation des courants [39].

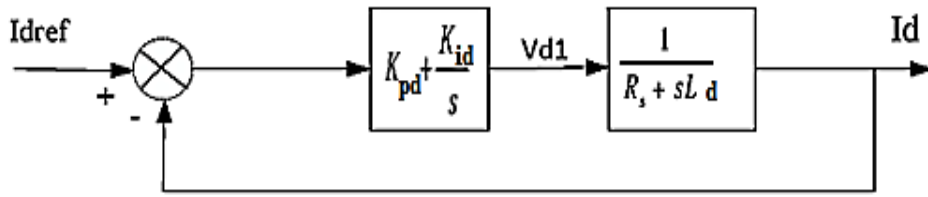


Figure II.6 : Boucle de régulation du courant i_d [34, 38].

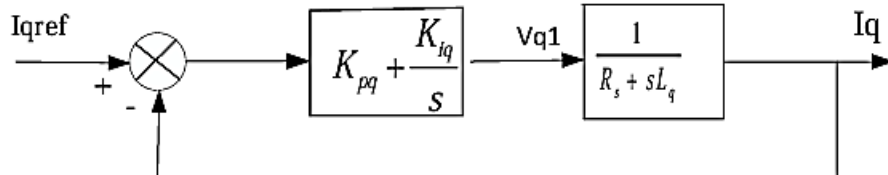


Figure II.7 : Boucle de régulation du courant i_q [38].

D'après la référence [17], les gains du régulateur (PI) pour un temps de réponse donné sont calculés comme suit :

$$\begin{cases} k_{id} = \frac{R_s}{\tau_d} \\ k_{pd} = \frac{L_d \cdot k_{id}}{R_s} \end{cases} \quad (II.8)$$

$$\begin{cases} k_{iq} = \frac{R_s}{\tau_q} \\ k_{pq} = \frac{L_q \cdot k_{iq}}{R_s} \end{cases} \quad (II.9)$$

Avec : τ_d et τ_q sont les constants de temps des régulateurs de courant on boucle fermée.

Les boucles de courants correspondent donc à un premier ordre, il suffit de fixer la dynamique du système à travers un choix approprié de τ_d et τ_q [17].

II.3.7.2 Régulateur de vitesse

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence afin de maintenir la vitesse constante [17].

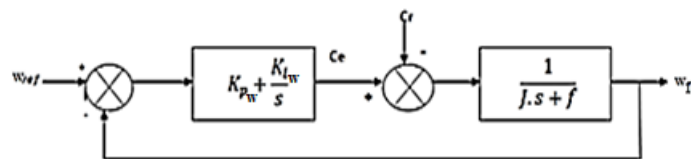


Figure II.8. Boucle de régulation de la vitesse [39]

D'après la référence [17], les gains du régulateur (PI) pour un temps de réponse donné sont calculés comme suit :

$$\begin{cases} K_{i\omega} = J \cdot \omega_0^2 \\ K_{p\omega} = \frac{2\xi \cdot k_{i\omega}}{\omega_0} - f \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

ω_0 : Pulsation propre du système.

ξ : Coefficient d'amortissement.

Les organes de commande introduisent des limitations sur la grandeur de commande. Ces limitations peuvent causer des problèmes lors de grands phénomènes transitoires sous formes d'un dépassement élevé de la grandeur à régler, voir même d'un comportement instable du réglage. La caractéristique non linéaire de la limitation ne permet plus l'application de la théorie linéaire afin d'analyser précisément le comportement dynamique dès que la sortie du régulateur est saturée. La saturation perturbe également le fonctionnement des régulateurs comportant une action intégrale. En effet, la composante intégrale continue à croître, bien que la sortie du régulateur soit limitée [23].

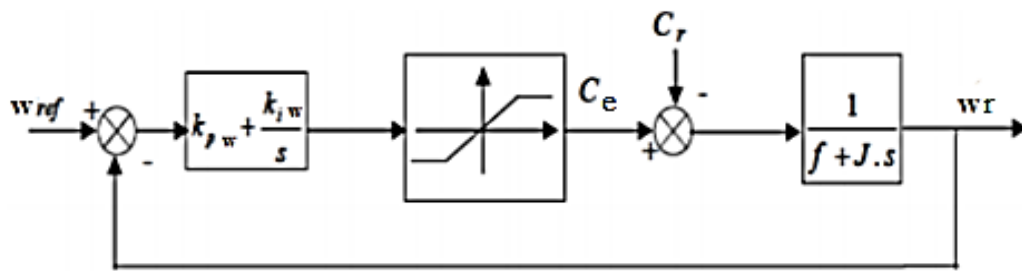


Figure II. 9 : Boucle de régulation de vitesse avec limitation [23].

Afin d'éviter ces inconvénients, il s'avère indispensable de corriger le comportement dynamique du régulateur (en particulier la composante intégrale) lorsque la limitation est atteinte. Cette mesure est appelée mesure anti- Windup (anti remise de l'emballement) [23].

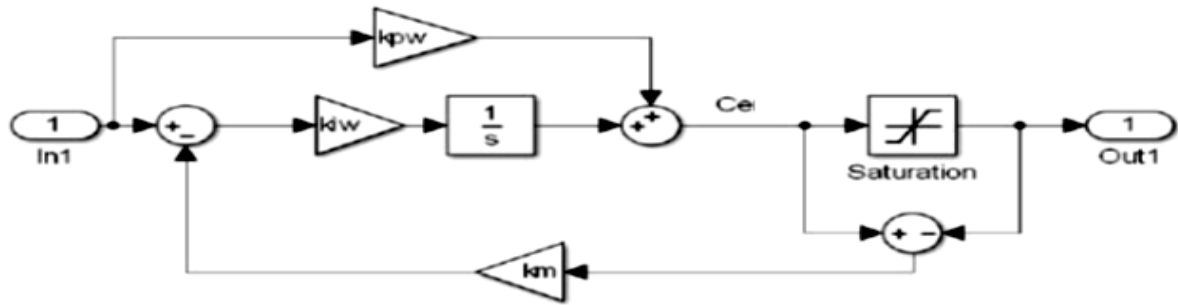


Figure II.10 : Régulateur PI avec anti-windup [23].

II.4 Commande par logique floue

La logique floue est une branche de l'intelligence artificielle, suscite un intérêt certain dans la communauté scientifique, tout comme les réseaux de neurones artificiels, les algorithmes génétiques et les systèmes experts. Est une technique de résolution de problèmes très puissants avec une large applicabilité dans le contrôle et la prise de décision [40].

II.4.1 Fonctions d'appartenance

Parmi les différentes formes de fonctions d'appartenance, les plus couramment utilisées sont [41] :

- Fonction d'appartenance trapézoïdale.
- Fonction d'appartenance triangulaire.
- Fonction d'appartenance gaussienne.
- Fonction d'appartenance sigmoïdale.

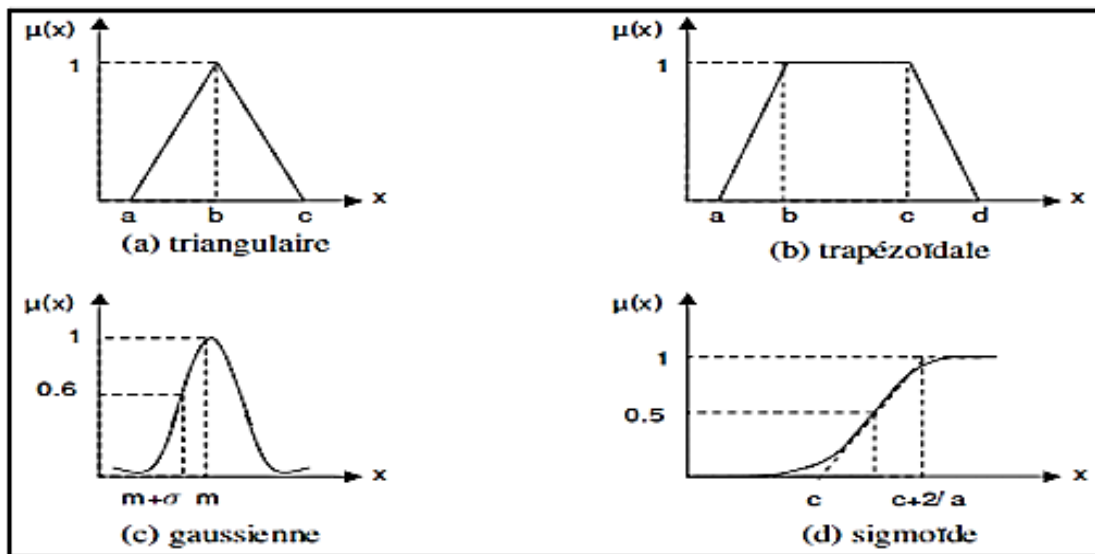


Figure II.11 : Différentes formes des fonctions d'appartenance [42].

II.4.2 Système de commande Flou

Le système flou se compose donc de trois étapes comme le montre la figure II.12. La première étape est l'étape de fuzzification, qui convertit les valeurs numériques en degrés d'appartenance dans différents ensembles flous des partitions. La deuxième étape concerne le module d'inférence, qui se compose de deux parties : le moteur de raisonnement et la base de règles. Enfin, l'étape de défuzzification permet de déduire la valeur nette (valeur exacte) qui peut être utilisée pour la commande à partir des résultats de l'agrégation de règles [41].

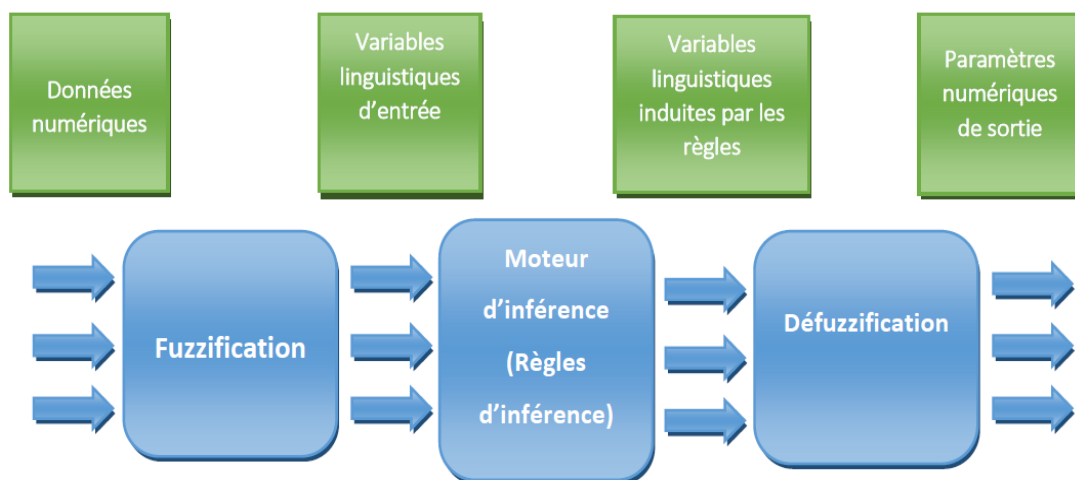


Figure II.12 : Schéma synoptique du système flou [41].

L'objectif de la commande est d'agir sur le processus afin d'atteindre un comportement désiré. De point de vue de l'automatique, il s'agit de synthétiser une loi de commande garantissant des performances sur le comportement du système en termes de stabilité, et de robustesse vis-à-vis de perturbations, etc [43].

II.4.2.1 Fuzzification

La fuzzification consiste à calculer, pour chaque valeur d'entrée numérique, les degrés d'appartenance aux ensembles flous associés et prédéfinis dans la base de données du système flou. Ce bloc réalise la transformation des entrées numériques en informations symboliques floues utilisables par le mécanisme d'inférence, c'est-à-dire le passage d'une grandeur numérique à une variable floue [44].

II.4.2.2 Mécanisme d'inférence

Les méthodes d'inférences les plus couramment utilisées sont les suivantes [45]:

- Méthode d'inférence max-min.
- Méthode d'inférence max-prod.
- Méthode d'inférence somme-prod.

II.4.2.3 Défuzzification

Consiste à transformer l'ensemble flou de sortie résultant de l'agrégation des règles en une grandeur de commande déterministe et précise à appliquer au processus.

Les stratégies les plus importantes pour cette opération sont les suivantes [45] :

- Méthode par centre de gravité ;
- Méthode du maximum.

II.4.3 Synthèses du régulateur de vitesse

La figure II.13 représente le schéma structurel du contrôleur flou proposé par Mamdani [2]:

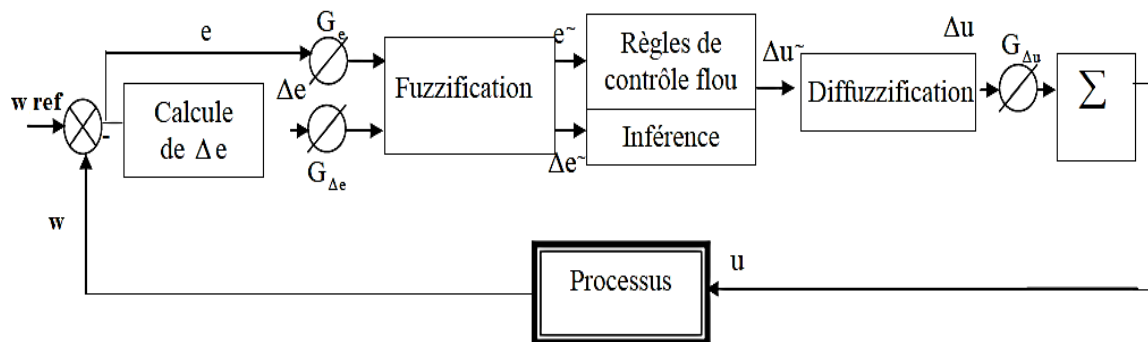


Figure II.13 Schéma bloc de régulation à contrôleur flou [2].

Ce travail s'appuie sur la référence [16], pour l'utilisation des fonctions d'appartenance (figures II.14 et II.15) et des tables de vérité (Tableau II.1).

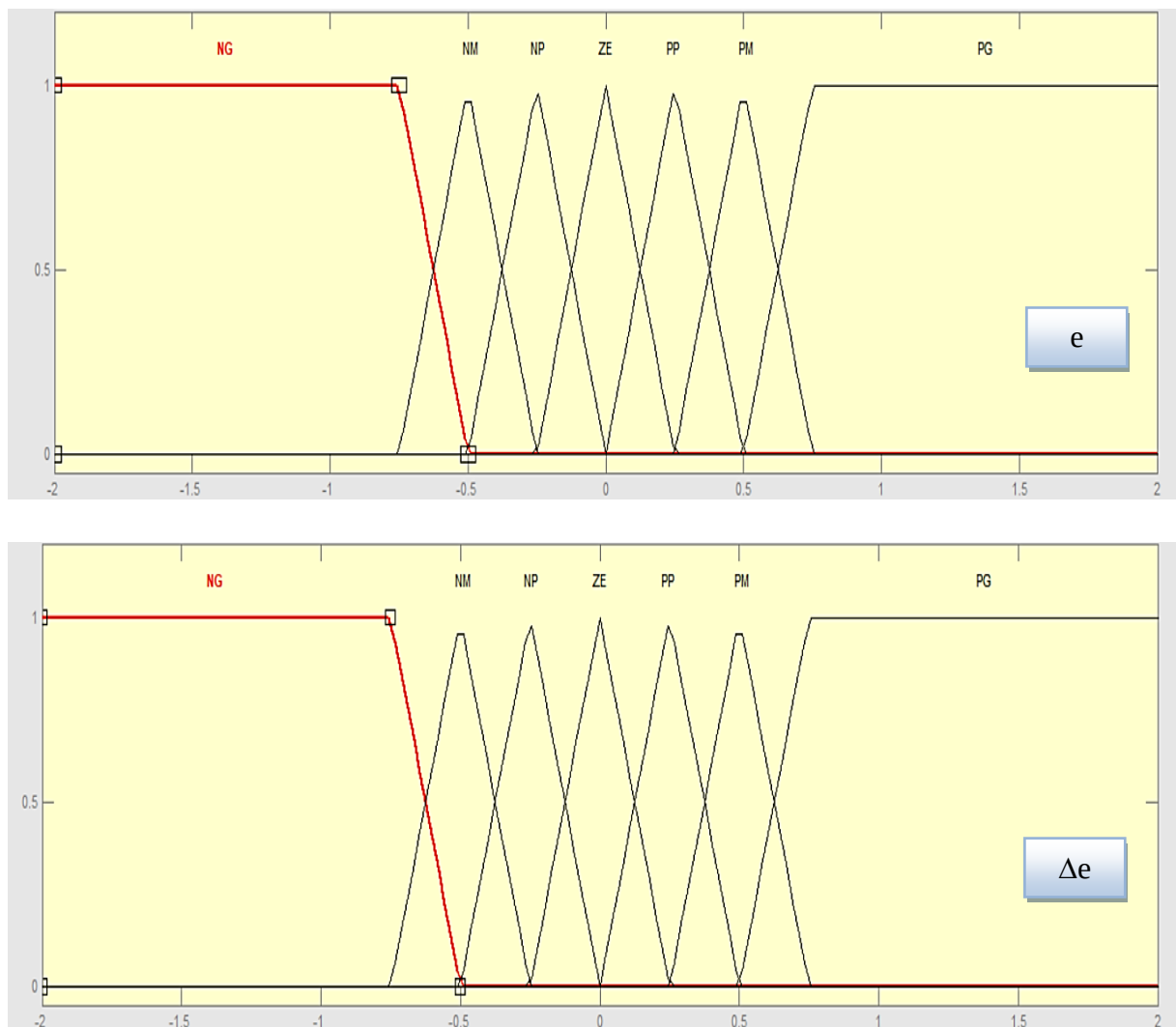


Figure II.14 : Fonction d'appartenance des variables d'entrées.

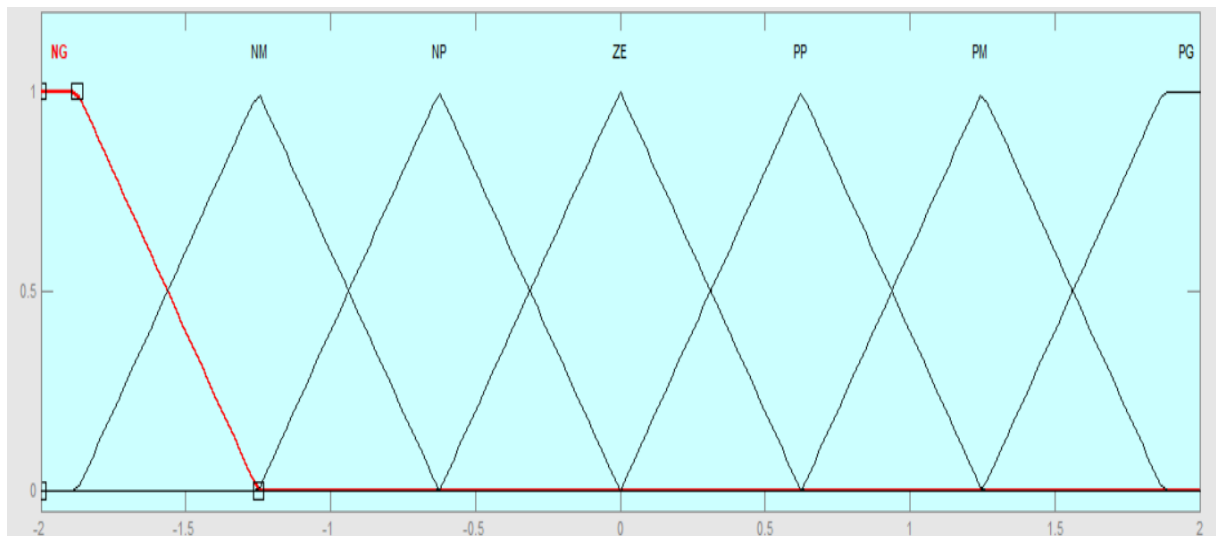


Figure II.15 : Fonction d'appartenance de la variable de sortie.

Les valeurs linguistiques [16]: NG : Négatif Grand, NM : Négatif Moyen, NP : Négatif Petit, ZE : Zéro (nulle), PP : Positif Petit, PM : Positif Moyen et PG : Positif Grand.

Tableau II.1 : Table de vérité [16].

Δe \ e	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	ZE
NM	NG	NG	NG	NM	NP	ZE	PP
NP	NG	NG	NM	NP	ZE	PP	PM
ZE	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
PP	NM	NP	ZE	PP	PM	PG	PG
PM	NP	ZE	PP	PM	PG	PG	PG
PG	ZE	PP	PM	PG	PG	PG	PG

II.4.4 Avantages et inconvénients de la commande par logique floue

Parmi les avantages et les inconvénients de la commande par logique floue, on peut citer [40] :

✓ **Avantages :**

- Résolution de problèmes complexes à plusieurs variables ;

- Possibilité d'intégrer une expertise ;
 - Le non nécessité d'une modélisation mathématique rigoureuse du processus ;
 - La réduction du temps de développement et de maintenance ;
 - La simplicité de définition et de conception.
- ✓ **Inconvénients :**
- La méthode d'ajustement est totalement empirique ;
 - Le rendement repose directement sur l'expertise.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques types de méthodes de commande pour les machines synchrones à aimants permanents. Nous nous sommes ensuite concentrés sur une étude approfondie de la commande vectorielle et de la commande par logique floue.

Une fois que nous aurons traité dans ce chapitre les aspects théoriques des différentes techniques de commande, en particulier la commande vectorielle et la commande par logique floue, le troisième et dernier chapitre sera consacré à la simulation.

Chapitre III

Simulation et interprétation des
résultats

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous simulerons la machine synchrone à aimants permanents en boucle ouverte. Ensuite, nous simulerons cette machine avec la commande vectorielle. La commande vectorielle est d'abord utilisée avec un régulateur de vitesse basé sur un PI avec anti-windup, puis avec un régulateur de vitesse basé sur la logique floue. Enfin, nous comparerons et évaluerons les performances de chaque régulateur et déterminerons lequel fournit la meilleure réponse en termes de stabilité et de rapidité.

III.2 Paramètres de la MSAP

Le tableau suivant (Tableau III.1) présente les paramètres de la MSAP [46].

Tableau III.1 Paramètres de la machine synchrone à aimants permanents [46].

Symboles	Description	Valeurs	Unités
P_n	Puissance nominale	1.5	kW
R_s	Résistance statorique	1.4	Ω
L_d	Inductance statorique directe	0.0066	H
L_q	Inductance statorique quadrature	0.0058	H
p	Nombre de paire de pôles	3	
Q_f	Flux de l'aimant permanent	0.1546	Wb
J	Moment d'inertie	0.00176	Kg.m ²
F_r	Coefficient de frottement visqueux	0.00038818	N.m /rad /s

III.3 Résultats de simulation

La figure III.1 présente le schéma de commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents, réalisé sous MATLAB / SIMULINK.

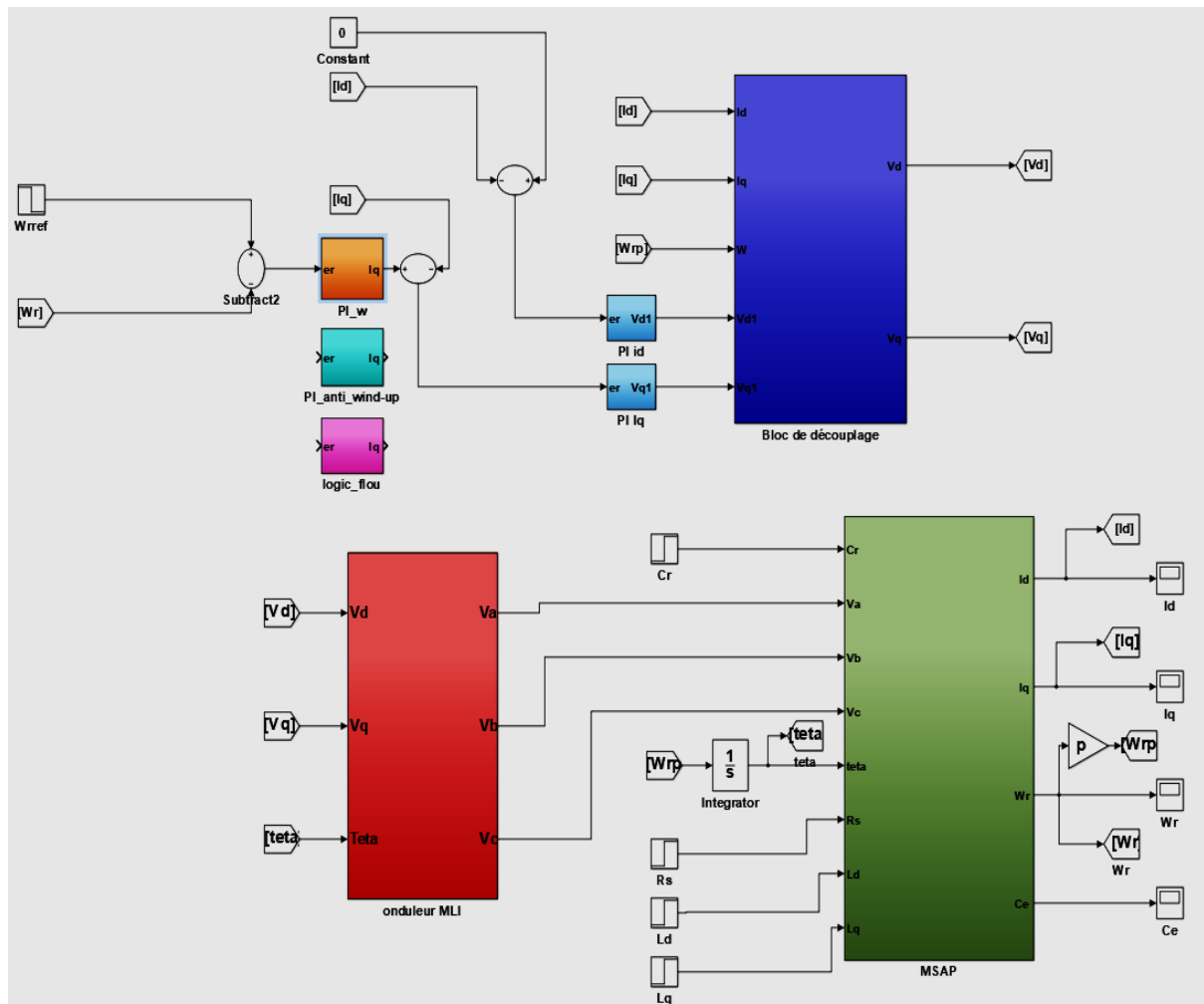


Figure III.1: Schéma de la commande vectorielle de la MSAP avec régulateur PI avec anti-windup et Flou, réalisé sous MATLAB / SIMULINK

III.3.1 Simulation de la MSAP

Les figures III.2 et III.3 présentent la vitesse et le couple de la MASP alimentée directement par le réseau.

Les figures III.2 et III.3 montrent que la MSAP a un comportement stable et satisfaisant. Cela indique que la machine fonctionne correctement d'un point de vue dynamique. Nous observons également que la vitesse atteint sa valeur nominale de 104,7 rad/s (en régime permanent), et que le couple électromagnétique, lorsqu'une charge de 5 N.m est appliquée (à $t=1s$), suit cette variation.

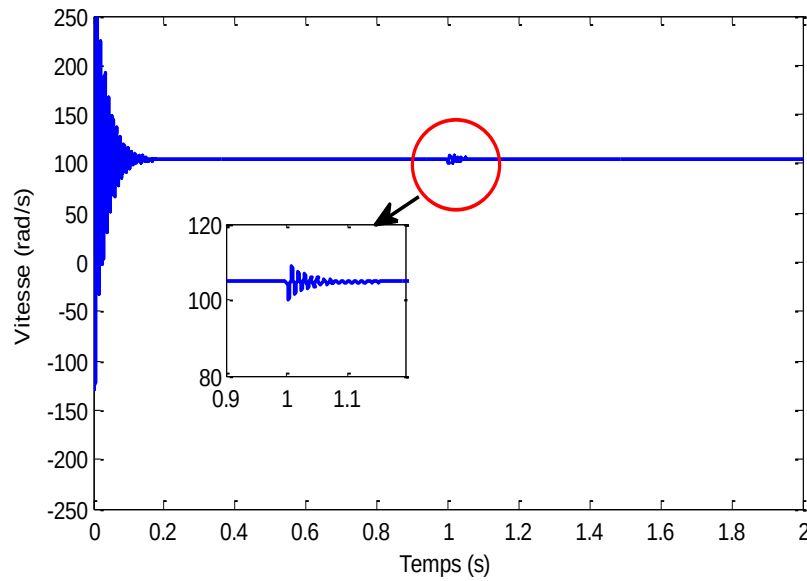


Figure III.2 : Courbe de la vitesse de rotation.

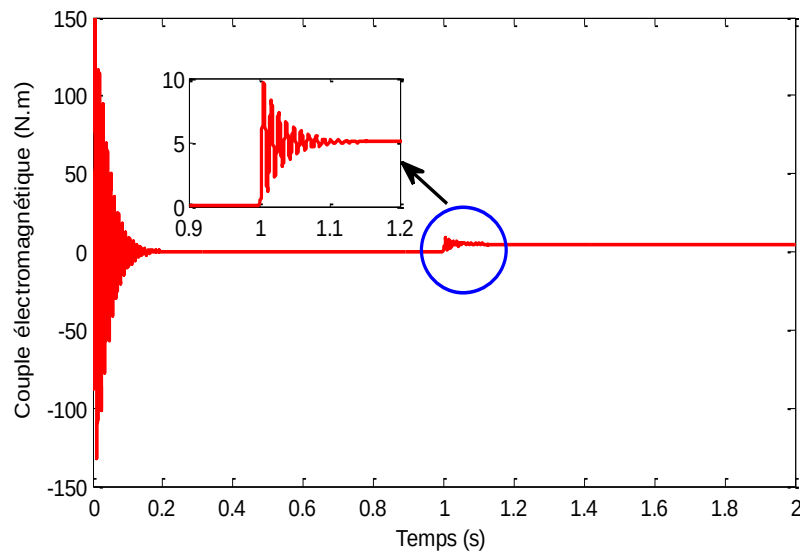


Figure III.3 : Courbe du couple électromagnétique.

III.3.2 Commande vectorielle

III.3.2.1 Régulation de la vitesse par PI avec anti-windup

La figure III.4 montre la courbe de vitesse obtenue avec un régulateur PI sans anti-windup, puis avec anti-windup. Cette comparaison permet d'évaluer l'effet de chaque stratégie de régulation sur la stabilité et la rapidité de la réponse dynamique. Dans cette simulation, la

vitesse de référence utilisée est de 80 rad/s. Le couple résistant de 5 N.m est appliqué à l'instant $t = 1$ s.

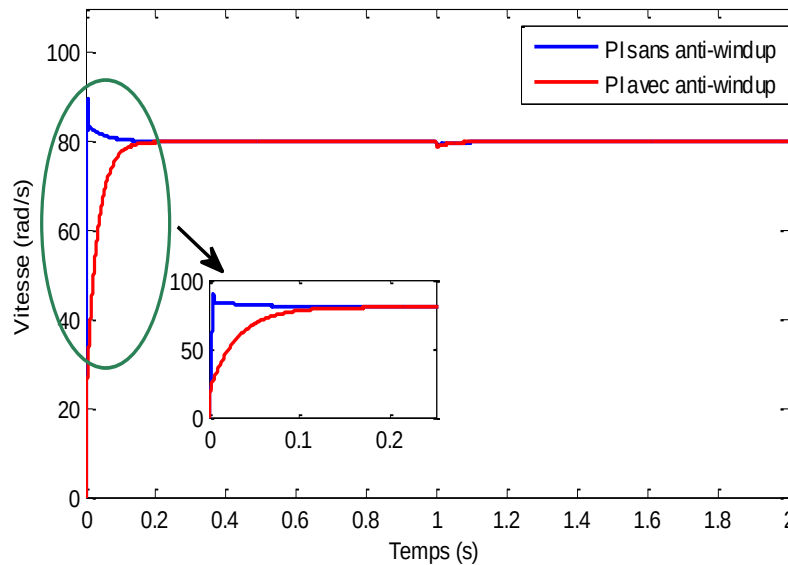


Figure III.4 : Étude comparative de la vitesse entre le régulateur PI sans et avec anti-windup.

A partir de la figure III.4, nous constatons que le régulateur PI avec anti-windup donne une réponse plus rapide et plus stable.

Pour la suite de la simulation, nous utiliserons le régulateur PI avec anti-windup.

Les figures III.5, III.6, III.7 et III.8 montrent l'évolution de la vitesse, du couple et des courants i_q et i_d .

La référence de vitesse de rotation de la MSAP est modifiée comme suit : elle passe de 80 rad/s à 20 rad/s à $t = 1$ s, puis à -20 rad/s à $t = 1.5$ s, ensuite à 20 rad/s à $t = 2$ s, et enfin à 60 rad/s à $t = 2.5$ s. Le couple résistant de 5 N.m est appliqué à l'instant $t = 0.5$ s, puis modifié à -5 N.m à $t = 1.5$ s, ensuite à 5 N.m à $t = 2$ s.

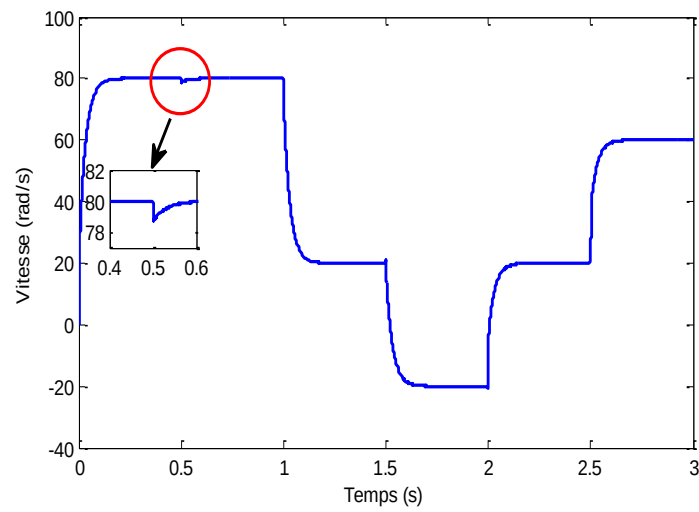


Figure III.5 : Courbe de la vitesse de rotation.

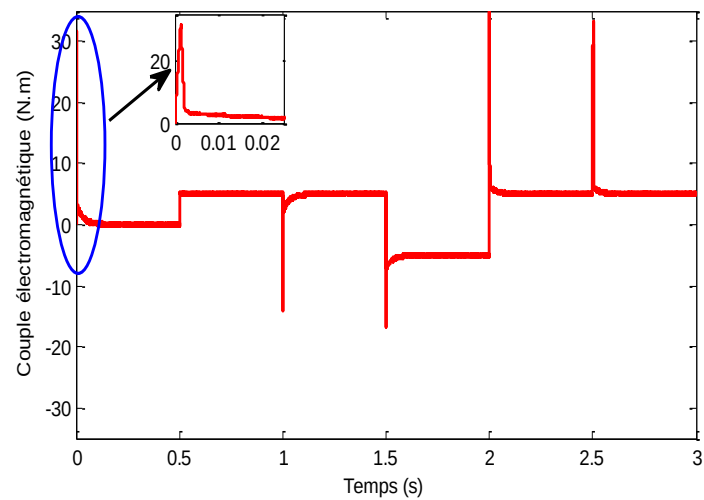


Figure III.6 : Courbe du couple électromagnétique.

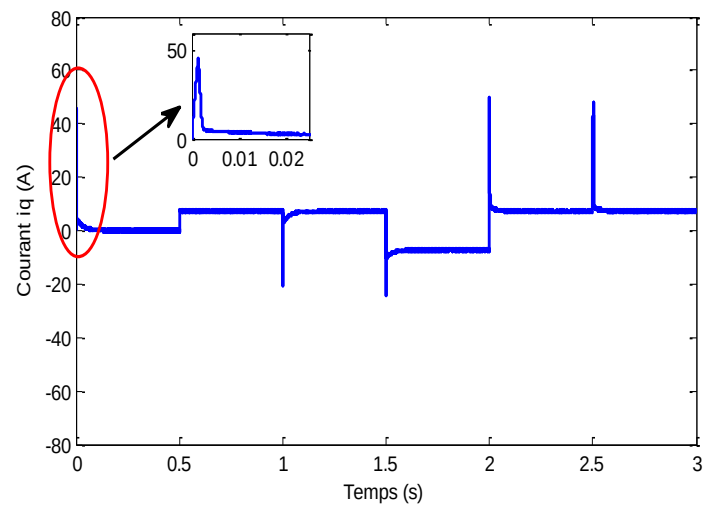


Figure III.7 : Courbe du courant sur l'axe q.

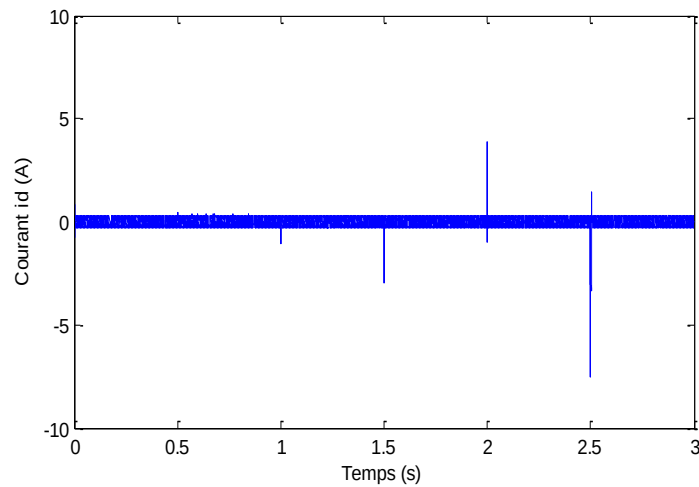


Figure III.8 : Courbe du courant sur l'axe d.

III.3.2.2 Régulation de la vitesse par logique floue

Les figures III.9, III.10, III.11 et III.12 montrent l'évolution de la vitesse, du couple et des courants i_q et i_d .

La référence de vitesse de rotation de la MSAP est modifiée comme suit : elle passe de 80 rad/s à 20 rad/s à $t = 1$ s, puis à -20 rad/s à $t = 1.5$ s, ensuite à 20 rad/s à $t = 2$ s, et enfin à 60 rad/s à $t = 2.5$ s. Le couple résistant de 5 N.m est appliqué à l'instant $t = 0.5$ s, puis modifié à -5 N.m à $t = 1.5$, ensuite à 5 N.m à $t = 2$.

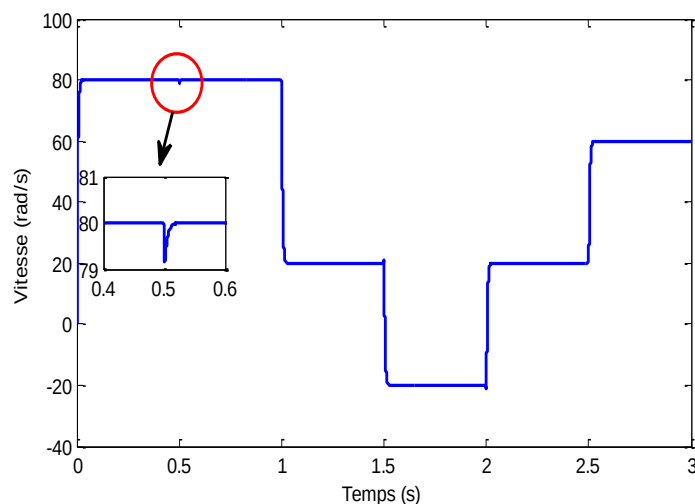


Figure III. 9: Courbe de la vitesse de rotation.

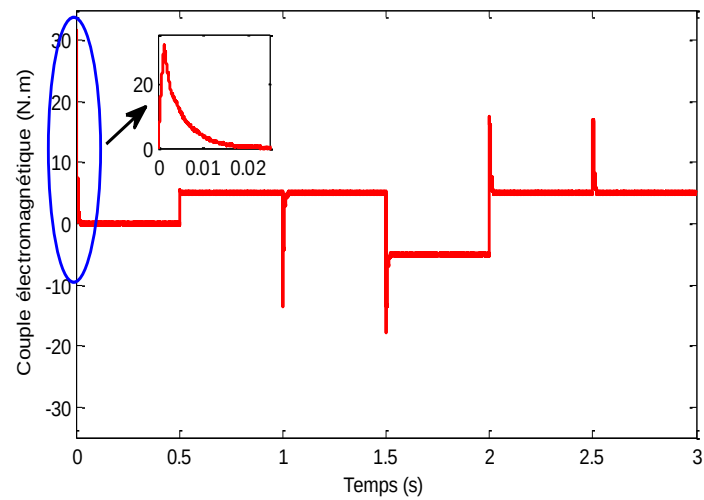


Figure III. 10 : Courbe du couple électromagnétique.

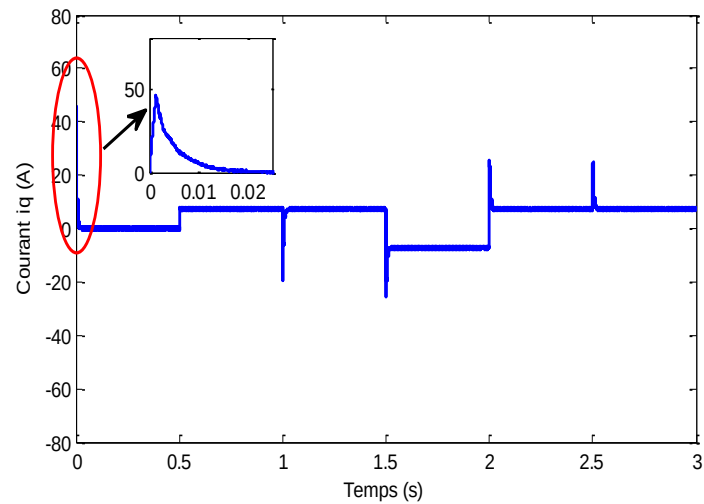


Figure III.11 : Courbe du courant sur l'axe q.

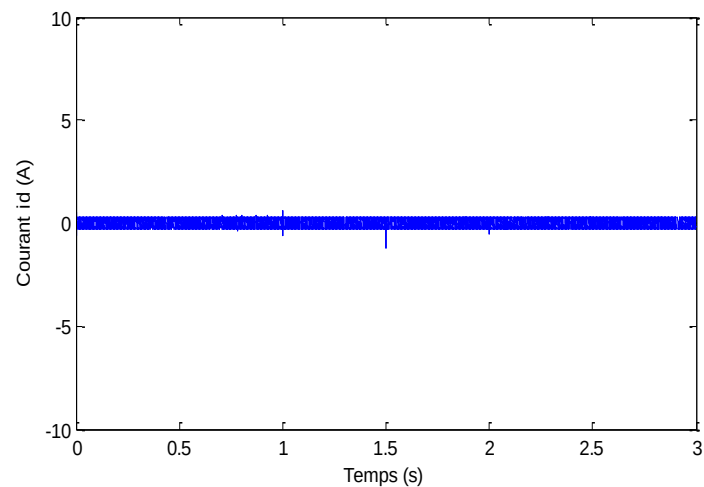


Figure III.12 : Courbe du courant sur l'axe d.

Les figures III.5 et III.9 illustrent que la vitesse suit la nouvelle consigne sans dépassement. Les figures (III.6, III.7, III.10 et III.11) de couple et de courant (i_q) présentent des pics (perturbations temporaires) lorsque la vitesse de rotation est modifiée, puis se stabilisent à la valeur souhaitée. On remarque également que l'effet de charge provoque une légère diminution de la vitesse, qui est rapidement ramenée à la valeur de référence désirée grâce à l'action du régulateur. On observe aussi que le courant i_q est égal au couple électromagnétique multiplié par un coefficient, et que le courant i_d est nul. Cela indique que le découplage est parfaitement réalisé.

III.3.3 Etude comparative

Dans cette simulation, nous comparons les deux régulateurs de vitesse, PI avec anti-windup et la logique floue. Le moteur démarre à vide, puis un couple de charge de 5 N.m est appliqué à $t = 0,4$ s, avec une vitesse de référence de 80 rad/s.

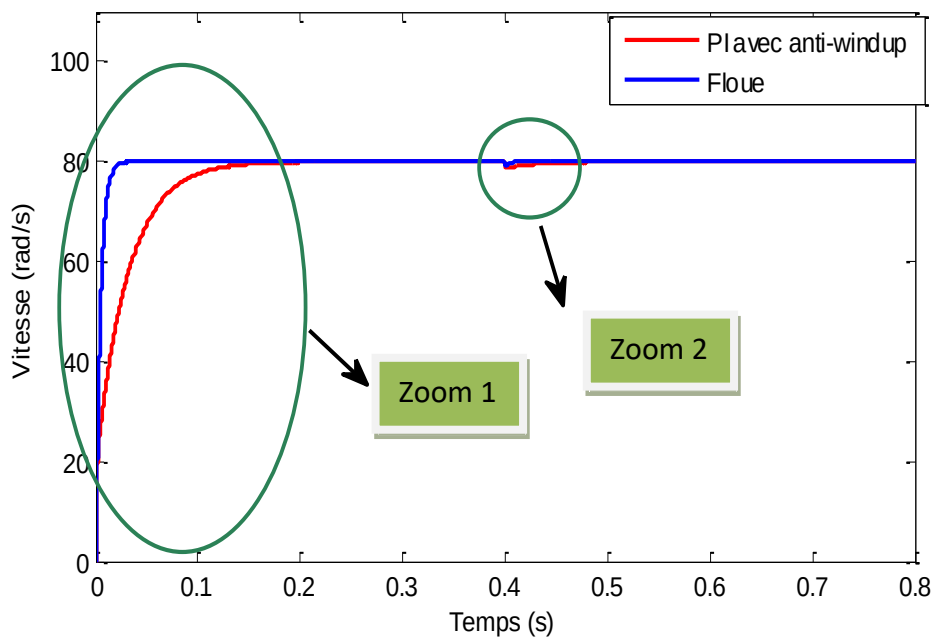


Figure III.13 : Étude comparative de la vitesse entre le régulateur PI avec anti-windup et le régulateur à logique floue.

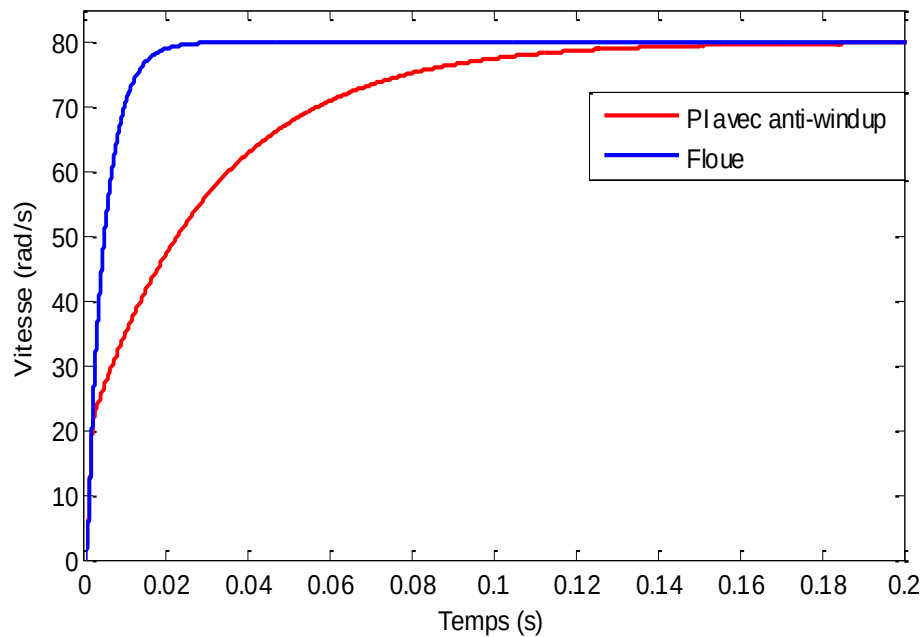


Figure III.14 : Réponse de la vitesse – phase de démarrage (Zoom 1).

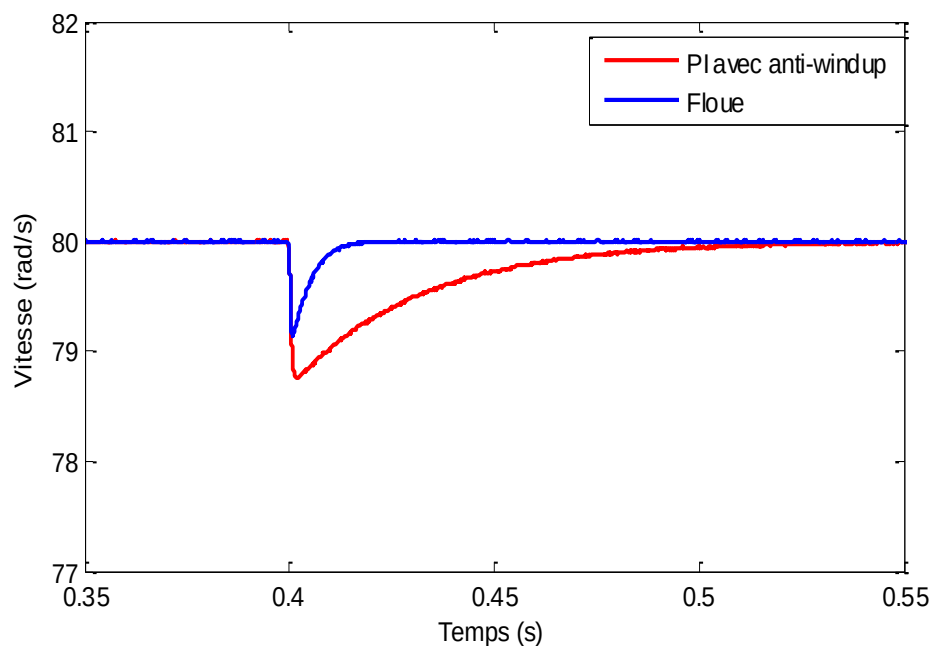


Figure III.15 : Réponse de la vitesse lors d'une perturbation (Zoom 2).

La figure III.13 montre que la régulation par logique floue est plus rapide que la régulation par PI avec anti-windup en termes de réponse, ce qui démontre l'efficacité de la logique floue dans l'amélioration des performances dynamiques du système. Lorsqu'une

charge est appliquée, on observe une légère diminution de la vitesse. Cependant, il est clair que le régulateur basé sur la logique floue corrige cette perturbation plus rapidement que le régulateur basé sur PI avec anti-windup.

III.4 Conclusion

Dans ce travail, nous avons d'abord simulé la machine synchrone à aimants permanents sans aucun système de commande afin d'étudier son comportement normal. Ensuite, nous avons appliqué la commande vectorielle en utilisant deux stratégies pour contrôler la vitesse de la machine :

- un régulateur basé sur un PI avec anti-windup.
- un régulateur basé sur la logique floue.

Les performances de chaque régulateur ont été analysées, en évaluant la précision et la rapidité de réponse. Les résultats ont montré que les deux régulateurs sont performants. Toutefois, le contrôle par logique floue se caractérise par un temps de réponse rapide et une grande précision, ce qui en fait une solution plus efficace et plus performante.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le contrôle de la vitesse est considéré comme l'un des fondements les plus importants de la régulation, pour cette raison, nous avons concentré nos efforts sur l'analyse et l'évaluation des performances du système de contrôle de la vitesse de la MSAP.

Dans ce mémoire, nous avons d'abord étudié les différents types de machines électriques, puis nous avons donné un aperçu de la MSAP. Pour modéliser la MSAP, nous avons utilisé les transformations de Park, qui nous permettent d'analyser et de simplifier considérablement le modèle mathématique de la machine.

Plusieurs méthodes de commande ont ensuite été présentées, dont la commande vectorielle. Nous avons simulé la commande vectorielle en testant les performances de deux techniques de contrôle de la vitesse : l'une basée sur un régulateur PI, et l'autre utilisant un régulateur flou. L'intégration de la logique floue a donné de bons résultats et s'est avérée efficace pour améliorer les performances du système.

Ensuite, nous avons comparé les deux régulateurs de vitesse, PI avec anti-windup et logique floue. Ces résultats ont montré que le contrôleur flou offre des performances dynamiques nettement supérieures à celles du contrôleur PI, notamment en termes de rapidité de réponse et de robustesse contre les perturbations. Ces caractéristiques permettent à la logique floue d'être une solution prometteuse pour améliorer la qualité du contrôle de la vitesse de la MSAP.

Enfin, pour améliorer ce travail modeste, les performances des contrôleurs flous peuvent être améliorées en intégrant des réseaux de neurones artificiels et des algorithmes génétiques, dans le but de développer un contrôleur flou plus robuste et plus stable.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] H. Chagra, R. Drihm, Y. Hamidi, S. Douib, "Commande vectorielle de la machine à induction avec observateur de flux", Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2023.
- [2] L. Chabani A. Guedda I. Messaoudi, "Commande par la logique floue de la machine synchrone a aimants permanents", Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2021.
- [3] M. Ouamane, " Les machines électriques dans les unités industrielles : pilotage et maintenance ", Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2019.
- [4] Z. Adaika, R. Tebbal, "La commande non linéaire d'une machine synchrone à aimants permanents par linéarisation entrée-sortie", Mémoire d'ingénieur École Supérieure En Sciences Appliquées -Tlemcen 2021.
- [5] A. Lakehal, "Etat de l'art sur les machines électrique et les Machines Synchrones à Aimant Permanant MSAP", Mémoire de master, Ecole Supérieure des Sciences Appliquées d'Alger ,2023
- [6] G. Bahi, " Etude et Synthèse d'un Contrôleur PI et Application", Mémoire de master, Universite Badji Mokhtar Annaba , 2017.
- [7] A. Hamitouche, M. Selmani, M. Zamoum, " Identification par Algorithmes Génétiques des Pertes dans un Moteur à Courant Continu à Excitation Séparée", Mémoire d'Ingénieur, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2013.
- [8] M. Bouazza, S. Mouhous, " Etude et simulation de la commande en vitesse d'un moteur à courant contenu sous proteus", Mémoire de master, Université Ibn-Khaldoune de Tiaret, 2019.
- [9] Cahier technique n° 207.shneider électrique.
- [10] H. Mesloub, " Commande DTC Prédictive D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents", Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2016.
- [11] M. Belaidi, Y. Chaker, "La modélisation de la machine asynchrone en vue de sa commande", Mémoire de licence, Université Badji Mokhtar Annaba, Mémoire de licence.
- [12] H. Belkacemi, M. Hamdous, "Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone", Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2010.
- [13] A. Merikhi, O .Abbes, "Commande par logique floue d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents", Mémoire de master, Université ibn Khaldoun Tiaret, 2016.
- [14] I. Khelif, "La Commande Direct du Couple D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents (MSAP) ", „Mémoire de master , Université Kasdi Merbah Ouargla, 2018.
- [15] M. Bounab, S. Bouaziz, "Commande par modes glissants de la machine Synchrone à aimant permanent ", Mémoire de master, Université Mohammed Seddik Ben Yahya JIJEL, 2021.

- [16] N. Choug, "Etude de la Robustesse des Contrôleurs Flous d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents avec Pilotage Vectoriel", Mémoire de magister, Université Hadj Lakhdar – Batna, 2011.
- [17] S. Arif, A. Bouchaala, " Commande de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) par les réseaux de neurones artificiels", Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2019.
- [18] Z. Lagoune, "Commande par hystérésis d'une machine synchrone a aimants Permanents en utilisant maxwell simplorer", Mémoire de master, Université de Setif-1,2011.
- [19] M.Chebabi, S.Hideb, "Commande Direct du Couple D'un Moteur Synchrone A Aimants Permanents", Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2022.
- [20] W. Belmenaouar, "Commande dynamique en mode glissant de la machine synchrone à aimants permanents alimentée en tension", Mémoire de master Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2017.
- [21] R. Abdessemed, M. Kadjoudj, " Modélisation des Machines Electriques ", Presses de L'Université de Batna ,1997.
- [22] A. Racid, "Modélisation et simulation des machines électriques", Presse de Université de Batna, 2011.
- [23] D. Ssemenda, " Commande Vectorielle de la machine synchrone a aimants permanents", Mémoire de master, Université Saad Dahlab de Blida, 2016.
- [24] A. Ghacha, A. Fezzai, " Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) ", Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2022.
- [25] R. Ouerdane, " Commande des Machine Synchrone à Aimants Permanents à saillance inverse", Mémoire de master, Ecole Nationale Polytechnique Alger, 2017.
- [26] B. Zegueb, " Commande d'une machine synchrone à aimants permanents sans capteur de vitesse : Utilisation d'un observateur non linéaire", thèse de magistère, Université de Batna 2008.
- [27] A. Belaidouni, M. Belmahi, " Contribution à la gestion d'énergie dans un véhicule électrique", Mémoire de master, Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, 2022.
- [28] S. Amara, "Commande par Réseaux de neurones d'une Machine Asynchrone avec Linéarisation Hybride", Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique Alger, 2005.
- [29] T. Lebed, S.Maiz, "Commande neuronale direct avec modele inverse un utilisant le perceptron multicouche", Mémoire de master, Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2017.
- [30] M. Taleb, "Commande par Mode de Glissement Floue avec Observateur : Application à Différents Pendules Inversés", Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique Alger, 2006.
- [31] M. Azzouni, I. Benbouzinane, "Commande Floue d'un Moteur à Courant Continu", Mémoire de master, Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, 2022.
- [32] L. Roukhmed, S. Saddiki, "Etude comparative entre la commande vectorielle et la DTC d'un MSAP", Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2022.
- [33] A. Belal, N. Addadj, " La commande sans capteur mécanique d'un moteur synchrone à aimants permanents", Mémoire de master, Université Akli Mohand Oulhadj Bouira, 2016.

- [34] S. Aribi, R.Nedjaa, "Commande par mode glissant de la Machine Synchrone à Aimants Permanents", Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2018.
- [35] F. Benchabane, "Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering", Mémoire de magister, Université Mohamed khider de Biskra, 2005.
- [36] F. Belayachi, F.Benabbou, "Etude comparative entre commandes par mode glissant d'ordre 2 appliquées à une MSAP", Mémoire de master, Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, 2022.
- [37] A. Maarouk, "Commande dynamique d'une machine synchrone à aimants permanents alimentée en tension", Mémoire de master, Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2016.
- [38] L. Deboucha, R. Achacha, "Commande vectorielle des machine synchrones à aimants permanents (MSAP) ", Mémoire de master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2022.
- [39] N. Sanhaji, A. Chalabi, "Commande du moteur synchrone a aimants permanents par backstepping, Mémoire de master", Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2015.
- [40] M. Benabdallah, N. Goffa, Y. Abdellaoui, "Utilisation de la logique floue pour la commande d'une éolienne à base de la MADA ", Mémoire de master, Centre universitaire salhi ahmed naama, 2022 .
- [41] A. Berrabah, O. Hamza, "Commande par logique floue d'une machine synchrone à aimant permanent", Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf Msila, 2018.
- [42] H. Barakati, "Modélisation floue d'un system non linéaire, Mémoire de master", Université Mohamed Boudiaf Msila, 2020.
- [43] H. Rahem, "Commande par logique floue d'un robot manipulateur à articulation flexible, Mémoire de master", Uniersite Muloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.
- [44] Kh. Gouasmia, B.Djendli , " Comparaison des contrôleurs intelligents d'un AVR, Mémoire de master", Université Badji Mokhtar Annaba, 2024.
- [45] O. Lahmar, S.Djeddi, " Etude comparative entre la commande par logique floue Et régulateur PI d'un MCC", Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2019 .
- [46] Z.Amina, Z Fadhila, " Etude de la commande DTC d'une MSAP a un onduleur multi-niveaux de tention", Mémoire de master, université saad dahlab de blida, 2013.

المخلص : يدرس هذا العمل ويحاكي نظام التحكم في السرعة لآلة متزامنة ذات المغناطيس الدائم. يتم أولاً عرض لمحة عامة عن الآلات الكهربائية، مع التركيز على الآلة المتزامنة ذات المغناطيس الدائم، بعد ذلك يتم تفصيل نمذجتها. يتم استخدام التحكم الشعاعي مع استراتيجيتين للتحكم في السرعة. تعتمد الاستراتيجية الأولى على استخدام وحدة تحكم PI تقليدية، في البداية بدون آلية anti-windup، ثم مع دمجها، بينما تعتمد الاستراتيجية الثانية على المنطق الضبابي. تُظهر نتائج المحاكاة أن التحكم المنطقي الضبابي يقدم أداءً أفضل من حيث الاستقرار وزمن الاستجابة.

الكلمات المفتاحية: الآلات الكهربائية، الآلة المتزامنة ذات المغناطيس الدائم، التحكم الشعاعي، وحدة التحكم، PI، المنطق الضبابي.

Abstract: This work studies and simulates a speed control system for a permanent magnet synchronous machine (PMSM). An overview of electrical machines is first presented, focusing on the PMSM, whose modeling is then detailed. Vector control is then used with two speed control strategies. The first strategy is based on the use of a conventional PI controller, first without an anti-windup mechanism, then with its integration, while the second is based on fuzzy logic. Simulation results show that fuzzy logic control offers better performance in terms of stability and response time.

Keywords: Electrical machines, Permanent magnet synchronous machine, Vector control, Regulator, PI, Fuzzy logic.

Résumé : Ce travail porte sur l'étude et la simulation d'un système de régulation de vitesse pour une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Une vue d'ensemble des machines électriques est d'abord présentée, avec un focus particulier sur la MSAP, dont la modélisation est ensuite détaillée. La commande vectorielle est ensuite utilisée avec deux stratégies de régulation de la vitesse. La première stratégie repose sur l'utilisation d'un régulateur PI conventionnel, d'abord sans mécanisme anti-windup, puis avec son intégration, tandis que la seconde est basée sur la logique floue. Les résultats de simulation montrent que la commande par logique floue offre de meilleures performances en termes de stabilité et de temps de réponse.

Mots-clés : Machines électriques, Machine synchrone à aimants permanents, Commande vectorielle, Régulateur, PI, logique floue.